



**Fachhochschule Hannover – Fakultät IV – Wirtschaft und Informatik**

**Masterarbeit**  
im Studiengang Unternehmensentwicklung

# **Marktuntersuchung zu virtuellen Kraftwerken**

---

Eingereicht am 10. Juni 2014

Sandra Harries  
Rühlmannstraße 1  
30167 Hannover

Matrikelnr.: 1214226  
Mobile: 0177 - 600 97 98  
Email: s.harries@gmx.de

Erstprüfer:  
Zweitprüfer:

Prof. Dr. Peter Hohberger  
Prof. Dr. Andreas Daum

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Energieversorgung in Deutschland.....</b>	<b>4</b>
2.1 Energiegewinnung und -verbrauch .....	4
2.1.1 Primärenergie.....	4
2.1.2 Sekundärenergie .....	7
2.1.3 End- und Nutzenergie .....	8
2.2 Die Energiewende .....	9
2.3 Elektrizitätswirtschaft in Deutschland.....	11
2.3.1 Allgemeine Marktdaten.....	12
2.3.1.1 Marktgröße .....	13
2.3.1.2 Marktwachstum.....	13
2.3.2 Aufbau des Stromnetzes .....	16
2.3.3 Netzstabilität.....	18
2.3.3.1 Netzfrequenz und Lastabdeckung .....	18
2.3.3.2 Bilanzkreise .....	21
2.3.3.3 Regelenergie .....	22
2.3.4 Stromgestehungskosten.....	23
2.3.4.1 Interne Kosten .....	23
2.3.4.2 Externe Kosten .....	27
2.3.5 Stromhandel.....	27
2.3.5.1 Regelenergiemarkt .....	28
2.3.5.2 Börsenhandel an der EEX .....	28
2.3.5.3 Regionale Direktvermarktung .....	29
2.3.6 Vergütungsmodelle nach dem EEG .....	29
2.3.6.1 Festpreisvergütung .....	30
2.3.6.2 Marktprämienmodell .....	31
<b>3 Das virtuelle Kraftwerk .....</b>	<b>33</b>
3.1 Smart Grids.....	33
3.2 Komponenten des virtuellen Kraftwerks.....	35
3.2.1 Dezentrale Energieerzeugungsanlagen .....	38
3.2.1.1 Biomasse.....	39

3.2.1.2	Wasserkraft .....	42
3.2.1.3	Windkraft .....	42
3.2.1.4	Solarstrahlung .....	44
3.2.1.5	Gravitationskraft.....	47
3.2.1.6	Geothermie .....	47
3.2.1.7	Kraft-Wärme-Kopplung .....	48
3.2.2	Verbraucher .....	50
3.2.3	Energiespeichertechnologien .....	52
3.2.3.1	Mechanische Speicher .....	53
3.2.3.2	Elektrische Speicher .....	57
3.2.3.3	Elektrochemische Speicher .....	58
3.2.4	Zentrale technische Steuerung .....	60
3.3	Betriebskonzepte virtueller Kraftwerke.....	63
<b>4</b>	<b>Untersuchung des Marktes für virtuelle Kraftwerke .....</b>	<b>65</b>
4.1	Methodisches Vorgehen .....	65
4.1.1	Stichprobe .....	66
4.1.2	Untersuchungsdesign.....	68
4.1.3	Ziele der Untersuchung .....	68
4.1.4	Hypothesen .....	69
4.1.5	Fragebogenerstellung .....	72
4.1.6	Pretest.....	74
4.1.7	Untersuchungsverlauf .....	74
4.2	Untersuchungsergebnisse .....	75
4.2.1	Hypothese 1: Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase. ....	75
4.2.2	Hypothese 2: Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum. ....	82
4.2.3	Hypothese 3: Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben. ....	88
4.2.4	Hypothese 4: Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung. ....	92
<b>5</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>97</b>
	<b>Anhang A – Fragebogen.....</b>	<b>99</b>
	<b>Anhang B – Matchingtabelle .....</b>	<b>106</b>
	<b>Anhang C – Definitionen.....</b>	<b>108</b>
	<b>Anhang D – Datentabelle .....</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>120</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>130</b>

## **Abkürzungsverzeichnis**

AFC	Alkalische Brennstoffzelle
AG	Aktiengesellschaft
AusglMechV	Ausgleichsmechanismusverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CAES	Compressed Air Energy Storage
CSP	Concentrated Solar Power
DEA	Dezentrale Energieerzeugungsanlage
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle
DSM	Demand Side Management
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ERP	Enterprise Ressource Planning
GuD	Gas- und Dampfturbinen
IT	Informationstechnologie
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Karbonatschmelze Brennstoffzelle
MessZV	Messzugangsverordnung
PAFC	Phosphorsaure Brennstoffzelle
PEMFC	Protonenleitende Brennstoffzelle
RLM	Registrierende Lastgangmessung
SMES	Supraleitender Magnetischer Energiespeicher
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle
StromNZV	Stromnetzzugangsverordnung
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilnetzbetreiber

## **Abstract**

Der deutsche Strommarkt befindet sich im Wandel von einer zentralen Stromerzeugung hin zu einer dezentralen. Eine wesentliche Rolle spielen in diesen Zusammenhang erneuerbare Energien, welche durch die Energiewende bis 2050 einen Anteil von mindestens 80 % des in Deutschland erzeugten Stroms ausmachen sollen. Diese haben jedoch den großen Nachteil, dass sie wetterbedingt eine hohe Volatilität aufweisen und eine geringe Planbarkeit der Stromerzeugung mit sich bringen. Um die Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten müssen sich die erzeugte Strommenge und deren Verbrauch stets im Gleichgewicht befinden. Eine Möglichkeit mit der Flexibilität der Erzeugung umzugehen bietet das Konzept der virtuellen Kraftwerke. Diese sind ein Zusammenschluss vieler dezentraler Erzeugungsanlagen, welche von einer zentralen technischen Steuerung koordiniert und gesteuert werden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Überblick über die aktuelle Situation auf dem Markt für virtuelle Kraftwerke geben. Mittels einer Expertenbefragung wurden diesbezüglich vier Hypothesen überprüft. Die Auswertung ergab, dass der Markt langfristig wächst und sich virtuelle Kraftwerke noch in der Erprobungsphase befinden. Entgegen gängigen Definitionen sind in virtuelle Kraftwerke häufig keine Speicher und Verbraucher integriert. Obwohl die Energieerzeugung ausschließlich mit erneuerbaren Energien möglich wäre, wird dies häufig nicht umgesetzt. Ein wichtiger Grund lag in dem vermehrten Einsatz von KWK-Anlagen, welche überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben werden.

## **Abstract**

The German electricity market is moving from a centralized power generation, to a decentralized production. The renewable energies are playing a substantial role regarding this change. Through the energy transition, which is aimed for 2050, these renewable energy sources shall cover up to 80 % of the generated electricity Germany's. Yet these sources suffer from the fact, that they show a high volatility in cause of their weather dependence and are therefore less predictable for the electric power generation. To preserve the stability of the power supply system, the generated energy and its usage must remain in a constant

balance. An opportunity to deal with this unstable generation, offers the concept of virtual power plants. These are a combination of several decentralized energy generation plants, which are coordinated and controlled by one central control station.

The following work shall deliver a comprehensive view of the current situation for the virtual power plant market. Through the acquisition of expert knowledge from science and practice, four hypotheses were constructed and reviewed regarding this matter. The evaluation showed that the market grows on a long-term, yet the virtual power stations are still stuck in the pilot stage. Contrary to the common definitions are the most virtual power plants not equipped with energy storages or electric consumers. Whilst the energy production with renewable energies exclusively may be possible, it is mostly not implemented. A main reason for this is frequent usage of cogeneration facilities, which mostly rely on fossil fuels.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	3
Abbildung 2: Primärenergiegewinnung in Deutschland (2012).....	5
Abbildung 3: Primärenergiegewinnung und –verbrauch in Deutschland .....	6
Abbildung 4: Primärenergieverbrauch in Deutschland (2012) .....	6
Abbildung 5: Energieumwandlungsprozess .....	7
Abbildung 6: Endenergie nach Anwendungsbereichen .....	9
Abbildung 7: Prognostizierter Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung .....	15
Abbildung 8: Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland (2010) .....	15
Abbildung 9: Struktur des deutschen Stromnetzes.....	16
Abbildung 10: Deutsches und kontinentaleuropäisches Verbundnetz.....	17
Abbildung 11: Schwankungen der Netzfrequenz.....	19
Abbildung 12: Lastprofil privater Haushalte in Niedersachsen (01.12.2013) ....	20
Abbildung 13: Regionale Einteilung der Stromgestehungskosten .....	25
Abbildung 14: Mögliche Gründe für einen Wechsel des Stromanbieters.....	26
Abbildung 15: Vergütungssätze für Photovoltaikanlagen in Cent pro kWh.....	30
Abbildung 16: Marktprämienmodell .....	32
Abbildung 17: Aufbau eines Smart Grids .....	34
Abbildung 18: Beispiel eines virtuellen Kraftwerks .....	37
Abbildung 19: Umwandlungsmöglichkeiten erneuerbarer Energiequellen .....	39
Abbildung 20: Vergleich der Energieumwandlungsketten .....	41
Abbildung 21: Größen der Windkraftanlagen .....	44
Abbildung 22: Parabolrinnenkollektor (links) und Turmkraftwerk mit Heliostatenfeldern (rechts) .....	47
Abbildung 23: Verbindung zum Verbraucher.....	50
Abbildung 24: Energiespeichertechnologien .....	52
Abbildung 25: Kapazitäten verschiedener Stromspeicher .....	53
Abbildung 26: Aufbau eines Pumpspeicherwerks .....	54
Abbildung 27: Aufbau eines Druckluftspeicherwerks.....	56
Abbildung 28: Methanisierung .....	59
Abbildung 29: Informationsflüsse in einem virtuellen Kraftwerk.....	61
Abbildung 30: Tageslastgang .....	64



Abbildung 31: Arten der Marktuntersuchung .....	65
Abbildung 32: Standorte der Leitwarten in Deutschland.....	67
Abbildung 33: Geschäftsfelder der befragten Teilnehmer .....	67
Abbildung 34: Befragungsverlauf .....	75
Abbildung 35: Inbetriebnahme der Forschungs- und Pilotprojekte .....	76
Abbildung 36: Beginn der kommerziellen Nutzung der virtuellen Kraftwerke ...	77
Abbildung 37: Eingesetzte Software zur Steuerung des virtuellen Kraftwerks .	79
Abbildung 38: Funktionen der eingesetzten Steuerungssoftware.....	80
Abbildung 39: Konkurrenzempfinden .....	85
Abbildung 40: Absatzmärkte des erzeugten Stroms.....	86
Abbildung 41: Geschätztes Vermarktungspotenzial virtueller Kraftwerke .....	87
Abbildung 42: Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in den virtuellen Kraftwerken.....	89
Abbildung 43: Integrierte Erzeugungsanlagentypen.....	91
Abbildung 44: Integrationen von Erzeugungsanlagentypen im Jahr 2015.....	91
Abbildung 45: Integrierte Erzeugungsanlagen.....	94
Abbildung 46: Eigentümer der Erzeugungsanlagen .....	94
Abbildung 47: Verbindungen zum Verbraucher.....	95

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geplanter Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Stromversorgung bis 2050 .....	10
Tabelle 2: Bruttostromerzeugung in Deutschland (2013) .....	13
Tabelle 3: Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern .....	14
Tabelle 4: Mittlere Stromgestehungskosten der Erzeugungsarten über einen Zeitraum von 40 Jahren (in Cent / kWh).....	25
Tabelle 5: Externe Stromgestehungskosten.....	27
Tabelle 6: Größte Herausforderungen beim Betrieb des virtuellen Kraftwerks.	78
Tabelle 7: Große Zeitaufwände beim Betrieb des virtuellen Kraftwerks .....	79
Tabelle 8: Geplante Anlagenintegrationen im Jahr 2015.....	83
Tabelle 9: Langfristig geplante Anlagenintegrationen.....	84
Tabelle 10: Integrierte Erzeugungsanlagen in den virtuellen Kraftwerken.....	89
Tabelle 11: Komponenten virtueller Kraftwerke laut Definitionen der Kraftwerksbetreiber .....	93
Tabelle 12: Komponenten im Theorie- und Praxisvergleich .....	96
Tabelle 13: Annahme und Verwerfung der Hypothesen .....	98

# 1 Einleitung

Sowohl der deutsche, als auch der gesamteuropäische Strommarkt waren bislang durch eine zentralisierte Stromproduktion aus fossilen und atomaren Energieträgern geprägt. Im Rahmen der Energiewende soll bis 2030 mehr als die Hälfte des in Deutschland produzierten Stroms aus regenerativen Energiequellen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen stammen. Die daraus resultierenden Veränderungen stellen neue Anforderungen an die deutsche Energieversorgung. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den damit einhergehenden Schwierigkeiten und betrachtet eines der möglichen Lösungskonzepte in der Praxis.<sup>1</sup>

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Erneuerbare Energien haben – neben den positiven Effekten für Umwelt und Klima – den großen Nachteil, dass sie wetterbedingt eine hohe Volatilität und somit geringe Planbarkeit der Energielieferung mit sich bringen. Eine Planbarkeit der Stromerzeugung ist jedoch zwingend notwendig, um die Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten. Die erzeugte Strommenge und deren Verbrauch müssen sich stets im Gleichgewicht befinden.<sup>2</sup>

Derzeit sind nur herkömmliche Kraftwerke in der Lage die Frequenzschwankungen im Stromnetz auszugleichen. Mit Zunahme der dezentral angesiedelten erneuerbaren Energieerzeuger werden diese in naher Zukunft jedoch erheblich zunehmen. Dies bedeutet letzten Endes, dass die temporär überschüssigen Energiespitzen von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen anderweitig gespeichert und im Bedarfsfall abgerufen werden können. Um eine bessere Integration der erneuerbaren Energien zu gewährleisten muss sich Deutschlands Energiemanagement dahingehend verändern, die schwankenden Produktionsmengen intelligent zu verteilen. Statt weniger Großerzeuger, werden zukünftig immer mehr Kleinerzeuger mit den Verbrauchern verbunden.<sup>3</sup> Einen vielversprechenden Lösungsansatz dieses Vorhabens bieten virtuelle Kraftwerke (VK), welche im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet werden.

---

<sup>1</sup> Vgl. (Voith, 2013), Seite 1

<sup>2</sup> Vgl. (Voith, 2013), Seite 1

<sup>3</sup> Vgl. (Servatius, Schneidewind, & Rohlfing, 2012), Seite 308 ff.

## **1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die vorliegende Arbeit soll einen Überblick über die aktuelle Situation auf dem deutschen Energiemarkt ermöglichen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Konzept der VK. Diese sind das zentrale Thema der Arbeit und sollen ausführlich betrachtet werden.

Die theoretischen Aspekte werden durch eine praktische Untersuchung des deutschen Marktes für VK anhand von vier Hypothesen ergänzt.

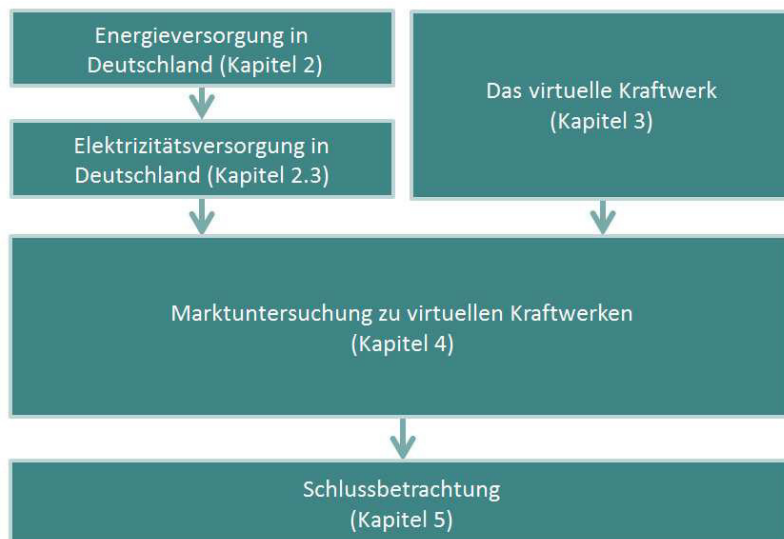
Das Primärziel der Marktuntersuchung bestand darin, einen aktuellen Marktüberblick des Umfelds der VK zu gewinnen. Durch die eingeleitete Energiewende und die Novellierung der verschiedenen Erneuerbaren-Energien-Gesetze war in diesem Zusammenhang die Einbindung erneuerbaren Energien in das Kraftwerkskonzept von besonderem Interesse. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollten Entwicklungstrends und -potenziale des Marktes aufgezeigt werden.

Da der Begriff des virtuellen Kraftwerks derzeit nicht einheitlich definiert ist, wurde in der Marktuntersuchung als Sekundärziel die praxisbezogene Sicht dieses Konzepts betrachtet und sollte mit den Definitionsansätzen aus der Theorie verglichen werden. Zudem soll ein Überblick über die Zusammensetzung und das Betriebsumfeld der VK in der Praxis ermöglichen werden.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im ersten Kapitel der Arbeit werden unter anderem die Problemstellung, sowie die Zielsetzung der Arbeit beschrieben. Die nachfolgenden Kapitel bilden den Theorie- und Praxisteil.

In Kapitel 2 wird zunächst im Allgemeinen auf die Energieversorgung in Deutschland eingegangen und ab Abschnitt 2.3 im Besonderen auf die Elektrizitätsversorgung (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: Aufbau der Arbeit<sup>4</sup>**

Kapitel 3 befasst sich mit der Idee des VK. Es werden zunächst Definitionsansätze verglichen und das VK in den Kontext eines Smart Grids eingeordnet. Im Anschluss werden zudem die vier wesentlichen Komponenten virtueller Kraftwerke näher beschrieben und Betriebskonzepte aufgezeigt.

Kapitel 4 beinhaltet als zentrales Thema der Arbeit: die Untersuchung des Marktes virtueller Kraftwerke. Neben den Untersuchungsergebnissen wird auf die methodische Durchführung der Untersuchung eingegangen.

In Kapitel 5 wird die Arbeit mit einer Schlussbetrachtung abgeschlossen, in welcher die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Fazit gezogen werden.

---

<sup>4</sup> Eigene Darstellung

## **2 Energieversorgung in Deutschland**

Durch die Einleitung der Energiewende steht Deutschland ein grundlegender Wandel des Energiemarktes bevor. Die herkömmlichen Versorgungsstrukturen müssen angepasst und erneuerbare Energieerzeuger effektiv in das Versorgungskonzept eingebunden werden. In diesem Kapitel werden zum einen der Grundgedanke der Energiewende betrachtet und zum anderen die vorhandenen Strukturen der Energieversorgung in Deutschland vorgestellt. Die vom Menschen am häufigsten genutzten Energieformen sind thermische, mechanische und elektrische Energie.<sup>5</sup> Da kommerziell betriebene VK aus wirtschaftlichen Gründen in die öffentliche Elektrizitätsversorgung eingebunden sind, wird im Rahmen dieser Arbeit insbesondere auf die elektrische Energieversorgung eingegangen.

### **2.1 Energiegewinnung und -verbrauch**

In der Energiewirtschaft werden verschiedene Arten von Energieträgern unterschieden, welche sich anhand ihres Vorkommens bzw. ihres Entstehens im Wertschöpfungsprozess in Primärenergie und Sekundärenergie klassifizieren lassen. Während des Umwandlungs- und Verteilungsprozesses der Energieträger entstehen in der Regel Energieverluste, so dass schlussendlich nur ein Teil der ursprünglich gewonnenen Energiemenge vom Endverbraucher nutzbar ist.

#### **2.1.1 Primärenergie**

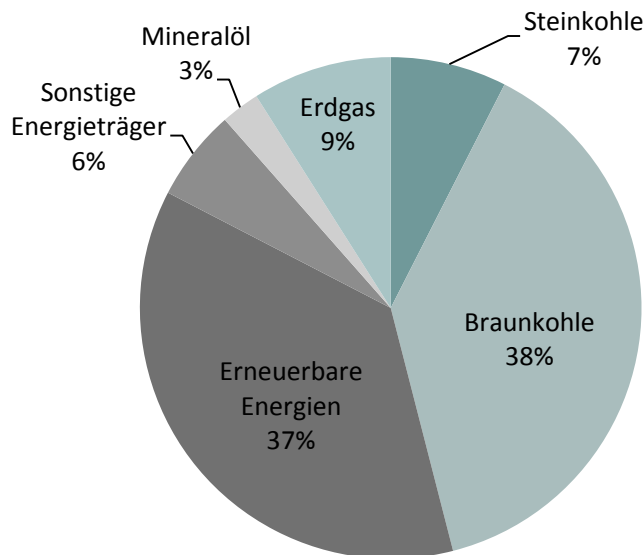
Primärenergie wird aus natürlichen Energiequellen in Form von erneuerbaren, fossilen und atomaren Energieträgern entnommen und zur Energieerzeugung eingesetzt.<sup>6</sup>

Deutschlands Primärenergiegewinnung wird überwiegend mittels fossiler Energieträger realisiert. Sie umfassten im Jahr 2012 einen Anteil von rund 57 %. Zu den fossilen Energieträgern zählen Braun- und Steinkohle, Mineralöle (Rohöl, Ölprodukte) und Erdgase (Abbildung 2).

---

<sup>5</sup> (BMWi, 2013), Seite 26

<sup>6</sup> Vgl. (Rädisch, 2013)



**Abbildung 2: Primärenergiegewinnung in Deutschland (2012)<sup>7</sup>**

Aus erneuerbaren Energieträgern, wie z.B. Sonnen- und Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Photovoltaik, wurde zu ca. 37 % Primärenergie gewonnen. Die restlichen 6 % wurden aus sonstigen Energieträgern, unter anderem Kernbrennstoffen, erzielt.<sup>8</sup>

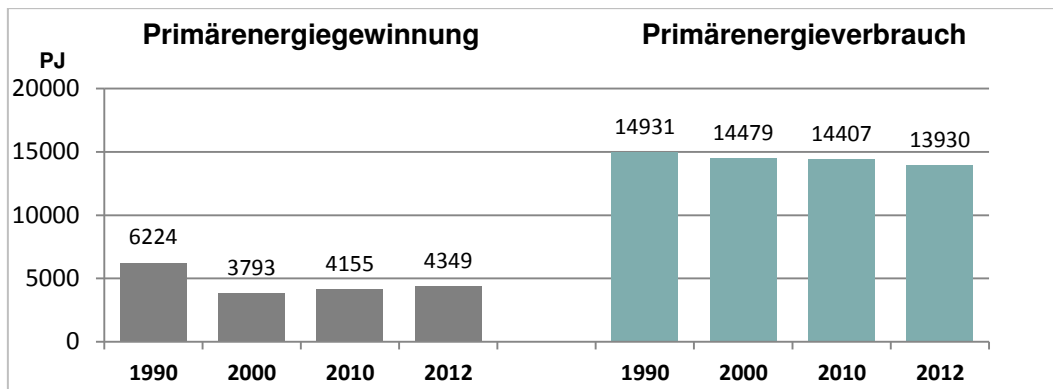
Stellt man der Primärenergiegewinnung den Primärenergieverbrauch gegenüber, so ist erkennbar, dass in Deutschland durchschnittlich etwa ein Drittel der benötigten Energie im Inland gewonnen wird. Im Jahr 2012 waren dies etwa 4349 Petajoule<sup>9</sup>, welche einem Verbrauch von ca. 13.930 Petajoule gegenüberstanden (siehe Abbildung 3). Der Restbedarf an Primärenergie, welche nicht im Inland gewonnen werden kann, wird durch Importe von Erdöl, Erdgas und Mineralöl aus dem Ausland gedeckt. Wobei letzteres den größten Anteil ausmacht.<sup>10</sup>

<sup>7</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013a), Seite 3

<sup>8</sup> Vgl. (Ströbele, Pfaffenberger, & Heuterkes, 2012), Seite 16

<sup>9</sup> 1 PJ = 277.778 MWh

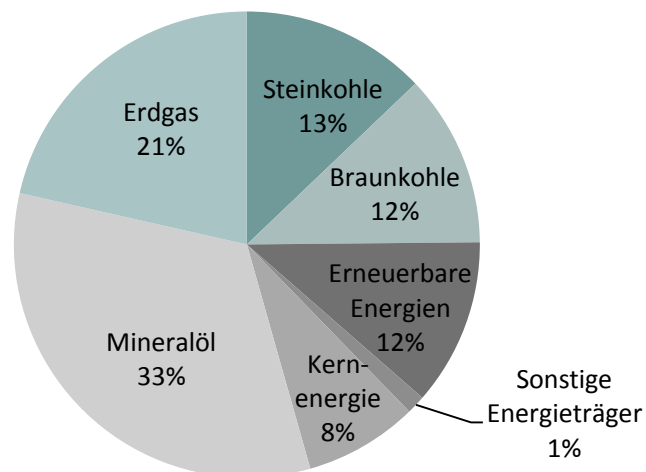
<sup>10</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 117



**Abbildung 3: Primärenergiegewinnung und –verbrauch in Deutschland<sup>11</sup>**

Im weltweiten Vergleich ist der Primärenergieverbrauch Deutschlands in den vergangenen 20 Jahren nahezu unverändert geblieben und seit 2007 sogar rückläufig, während der globale Primärenergieverbrauch jährlich um etwa 2 % stieg.<sup>12</sup>

Der Anteil fossiler Energie am Primärenergieverbrauch betrug im Jahr 2012 ca. 80 % (siehe Abbildung 4). Lediglich 12 % des Energieverbrauchs Deutschlands wurden mittels erneuerbarer Energien gedeckt.<sup>13</sup>



**Abbildung 4: Primärenergieverbrauch in Deutschland (2012)<sup>14</sup>**

Um Deutschland zukünftig unabhängiger von Energieimporten zu machen, wurde im Sommer 2011 ein umfangreiches Gesetzespaket von der Bundesre-

<sup>11</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013a), Seite 2f.

<sup>12</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 117

<sup>13</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013a), Seite 2f.

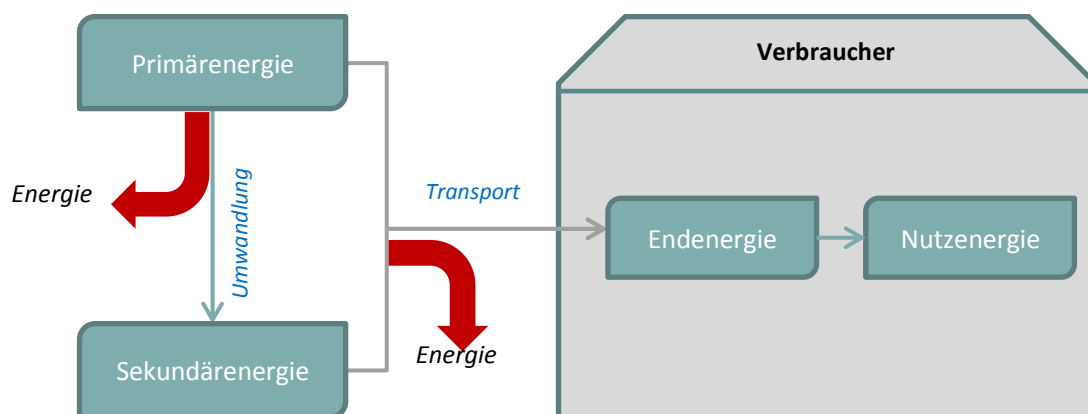
<sup>14</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013a), Seite 4



gierung erlassen.<sup>15</sup> Die Energieversorgung soll im Rahmen der Energiewende aus- und umgebaut werden, so dass erneuerbare Energien den Hauptanteil des Energiebedarfs decken.<sup>16</sup>

### 2.1.2 Sekundärenergie

Um Primärenergie für die Verbraucher leichter nutzbar zu machen, wird sie von den Energieversorgungsunternehmen in der Regel in Sekundärenergie umgewandelt (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5: Energieumwandlungsprozess<sup>17</sup>**

Sekundärenergie kann als Elektrizität, Wärme oder Treibstoff vorliegen. Sekundäre Energieträger sind gegenüber den Primären schneller transportabel, besser verteilbar und leichter zu speichern.<sup>18</sup>

Der Umwandlungsprozess findet unter anderem in Brikettfabriken, Kokereien, Gas- und Heizwerken, thermischen Kraftwerken, sowie Heiz- und Wasserkraftwerken statt.<sup>19</sup> Die häufigste Energieform ist Elektrizität, welche den Verbrauchern über ein flächendeckendes Stromnetz zur Verfügung gestellt wird. Bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie kommt es zu Verlusten, welche überwiegend in Form von Wärme anfallen.<sup>20</sup> Modernen Kraftwerken ist es heut-

<sup>15</sup> Vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013a)

<sup>16</sup> Vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013b)

<sup>17</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (ASUE, 2005)

<sup>18</sup> Vgl. (Grathwohl, 1983), Seite 183

<sup>19</sup> Vgl. (Ströbele, Pfaffenberger, & Heuterkes, 2012), Seite 17

<sup>20</sup> Vgl. (i12 GmbH, ohne Jahr)

zutage möglich die Abwärme in Form von Nah- und Fernwärme energetisch sinnvoll einzusetzen und somit den Wirkungsgrad der Anlagen zu steigern.<sup>21</sup>

### **2.1.3 End- und Nutzenergie**

Bevor der Verbraucher die Primär- und Sekundärenergie vor Ort nutzen kann, muss sie ihm zunächst zugänglich gemacht werden. Durch die Transportwege entstehen weitere Energieverluste. Die Energiemenge, welche dem Verbraucher nach Abzug aller Umwandlungs- und Transportverluste zur Verfügung steht, wird als Endenergie bezeichnet.<sup>22</sup> Als Endenergieträger werden überwiegend Mineralölprodukte, Gase und elektrischer Strom abgenommen. Letzterer ist die hochwertigste Energieform und wird an alle Verbrauchergruppen (private Haushalte, Industrie, Dienstleister, Gewerbe, Handel, Verkehrssektor) geliefert. Der Endverbraucher nutzt die ihm gelieferte Endenergie und wandelt sie durch die Erzeugung von Licht, Schallwellen, Wärme, Kälte oder Bewegung in Nutzenergie um.<sup>23</sup> In Deutschland machten im Jahr 2011 thermische und mechanische Energie den Großteil des Endenergieverbrauchs aus (siehe Abbildung 6).

Bei einer Betrachtung des Gesamtendenergieverbrauchs in Deutschland nahm Wärme mit knapp 56 % den größten Anteil ein, gefolgt von mechanischer Energie mit knapp 36 %. Die restlichen 8 % der Endenergie wurden zum Betrieb von Kälteanwendungen, Beleuchtung, sowie Information- und Kommunikationstechnologien (IKT) verwendet.<sup>24</sup>

---

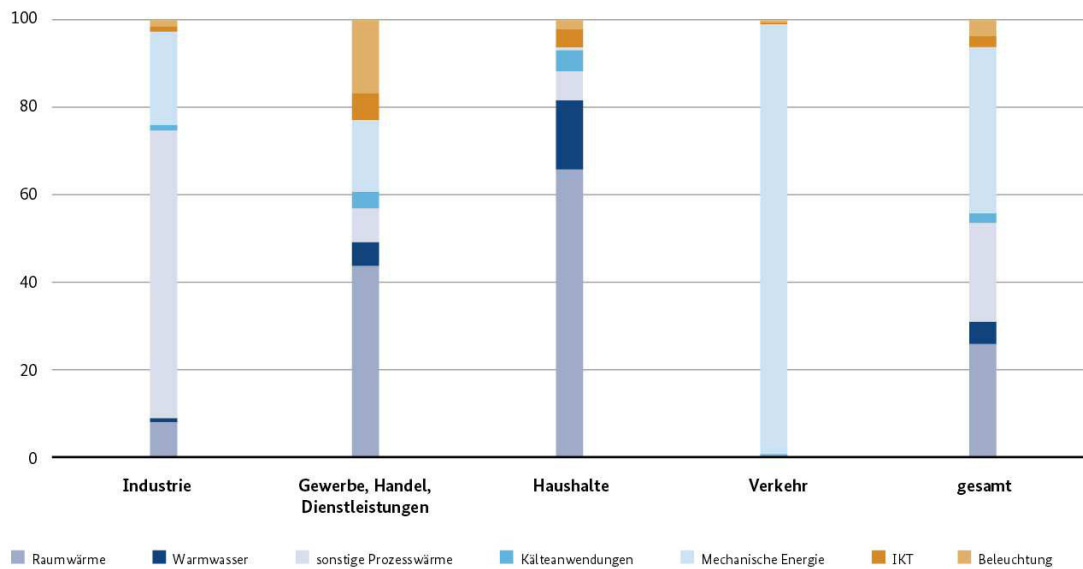
<sup>21</sup> Vgl. (i12 GmbH, ohne Jahr)

<sup>22</sup> Vgl. (INES Energieplanung GmbH, 2013), Seite 1f.

<sup>23</sup> Vgl. (Ströbele, Pfaffenberger, & Heuterkes, 2012), Seite 18

<sup>24</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013b), Seite 16, 18, 25

**Endenergie nach Anwendungsbereichen**  
2011, in Prozent



**Abbildung 6: Endenergie nach Anwendungsbereichen<sup>25</sup>**

## 2.2 Die Energiewende

Im November 2009 beschloss die Bundesregierung im Rahmen der Meseberger Beschlüsse den Aufbruch in ein neues Energieversorgungszeitalter. So entstand ein Jahr später, am 28. September 2010, das Energiekonzept 2050, welches eine „*umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*“<sup>26</sup> in Deutschland zum Ziel hat.<sup>27</sup> Neben dem Ausbau erneuerbarer Energien soll die Energieeffizienz erhöht, sowie der Energieverbrauch gesenkt werden.<sup>28</sup>

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung soll in den nächsten Jahrzehnten gemäß nachfolgender Staffelung (siehe Tabelle 1) kontinuierlich gesteigert und die dezentralen Energieerzeugungsanlagen ins deutsche Elektrizitätsversorgungssystem integriert werden.

<sup>25</sup> (BMWi, 2013), Seite 26

<sup>26</sup> (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011)

<sup>27</sup> Vgl. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013)

<sup>28</sup> Vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, ohne Jahr)

Jahr	Zielwert
bis 2020	mind. 35 %
bis 2030	mind. 50 %
bis 2040	mind. 65 %
bis 2050	mind. 80 %

**Tabelle 1: Geplanter Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Stromversorgung bis 2050<sup>29</sup>**

Bis 2050 soll der Anteil erneuerbarer Energien mindestens 80 % an der Stromversorgung in Deutschland ausmachen. Der resultierende Investitionsbedarf zur Erreichung dieses Ziels wurde von der Bundesregierung auf 550 Milliarden Euro geschätzt.<sup>30</sup>

Es ist deutlich erkennbar, dass erneuerbare Energien eine zentrale Rolle in der 2010 propagierten Energiewende einnehmen. Das Reaktorunglück am 11. März 2011 in Fukushima, beschleunigte diesen Wandel deutlich. Bereits drei Tage später setzte die Bundesregierung die Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke aus und unterzog sie einer Sicherheitsprüfung. Innerhalb dieser drei Monate erloschen die Berechtigungen zum Leistungsbetrieb von sieben deutschen Kernkraftwerken; die Abschaltung der restlichen Kernkraftwerke soll gestaffelt bis spätestens 2022 erfolgen.<sup>31</sup> „Nur wenige Länder haben (aus dem Unglück) [...] derart radikale Schlüsse gezogen wie Deutschland. Dennoch hat Fukushima die Welt verändert, zu einer Renaissance der Atomenergie wird es nicht mehr kommen.“<sup>32</sup>

Das Unglück von Fukushima hat zudem eine Veränderung im Denken der Verbraucher hervorgerufen. In den ersten Monaten nach dem Reaktorunglück stieg die Nachfrage der Endverbraucher zu Ökostrom deutlich an. Dieser sogenannte Fukushima-Effekt bewegte knapp eine Millionen deutsche Endverbraucher zur Nutzung von Ökostromprodukten. Während es im Jahr 2010 etwa 4,5 Millionen Verbraucher Ökostrom bezogen, waren es nach dem Reaktorunglück 5,5 Milli-

<sup>29</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2012), §1 (2)

<sup>30</sup> Vgl. (Osterkorn & Petzold, 2012), Seite 85

<sup>31</sup> Vgl. (Bundesregierung, 2011)

<sup>32</sup> (Hedtstück, 2011)

onen.<sup>33</sup> Der Fukushima-Effekt hielt jedoch nicht lange an. Am Jahresende verzeichneten viele Unternehmen eine nachlassende Dynamik.<sup>34</sup>

Um einen etwaigen Einbruch in der Energieversorgung durch den Wegfall der Atomenergie zu kompensieren, verabschiedete die Bundesregierung in den Jahren 2011 bis 2013 verschiedene Förderungsinitiativen erneuerbarer Energieversorgungssysteme.<sup>35</sup>

Um die erneuerbare Energie in das derzeitige Stromnetz integrieren zu können, sind jedoch grundlegende Aus- und Umbauarbeiten der Netzinfrastruktur erforderlich, welche die deutsche Energieversorgung sowohl vor technische, als auch ökonomische Herausforderungen stellen.<sup>36</sup>

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), welches die Entwicklung einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland fördern soll, verpflichtet Netzbetreiber in § 8 (1) erneuerbare Energie bei der Stromeinspeisung ins Netz zu bevorzugen und die gesamte angebotene Strommenge abzunehmen und zu übertragen, sofern dadurch kein Schaden zu erwarten ist. Besteht für eine Anlage zur Erzeugung erneuerbarer Energien kein oder ein unzureichender Zugang zum Stromnetz, so ist der Netzbetreiber durch § 9 weiterhin verpflichtet, diesen gemäß des Standes der Technik zu ermöglichen, sofern dies für ihn wirtschaftlich zumutbar ist. Die Kosten des Netzanschlusses der Anlage hat gemäß § 13 (1) der Anlagenbetreiber zu tragen.<sup>37</sup>

Um die Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung zu erhöhen und den Netzausbau zu beschleunigen, haben Bürger seit Juli 2013 die Möglichkeit in den Ausbau des deutschen Stromnetzes zu investieren.<sup>38</sup>

### **2.3 Elektrizitätswirtschaft in Deutschland**

Die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland unterlag durch die Liberalisierung der Strommärkte im Jahr 1998 einem großen Wandel. Durch die Einführung des Wettbewerbs konnten Verbraucher den Energieversorger fortan frei wählen, wodurch diese ihr Angebotsmonopol verloren. Zudem eröffnete sich die

---

<sup>33</sup> Vgl. (trend:research GmbH, 2013)

<sup>34</sup> Vgl. (Köpke, 2012)

<sup>35</sup> Vgl. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013)

<sup>36</sup> Vgl. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011)

<sup>37</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2012), § 8, 9, 13

<sup>38</sup> Vgl. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013)

Möglichkeit des überregionalen Stromhandels.<sup>39</sup> Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft begründete die Liberalisierung folgendermaßen: „Ohne einen wettbewerbsorientierten und effizienten europäischen Strom- und Gasmarkt werden die europäischen Bürger stark überhöhte Preise zahlen müssen [...]. Darüber hinaus ist ein wettbewerbsorientierter und effizienter Strom- und Gasmarkt Vorbedingung für die Bekämpfung des Klimawandels. Nur bei einem funktionierenden Markt lässt sich ein wirksamer Mechanismus für den Emissionshandel entwickeln, (sowie) eine Industrie für erneuerbare Energien aufbauen [...].“<sup>40</sup> Die Liberalisierung des Strommarktes zog einen weiteren großen Wandel der Elektrizitätswirtschaft nach sich, welcher im Jahr 2010 mit dem Energiekonzept 2050 eingeleitet wurde und die Marktsituation erneut fundamental veränderte. Im Folgenden Abschnitt werden die aktuelle Marktsituation, sowie die Entwicklungstendenzen näher betrachtet. Zudem wird auf die Rahmenbedingungen der Elektrizitätsversorgung in Deutschland eingegangen.

### **2.3.1 Allgemeine Marktdaten**

Die folgenden Marktdaten beziehen sich auf die Elektrizitätsversorgung in Deutschland und legen die inländische Bruttostromerzeugung zugrunde. Bedingt durch das von der Bundesregierung festgelegte Energiekonzept 2050 (siehe Abschnitt 2.2) findet in den nächsten Jahrzehnten ein kontinuierliches Marktwachstum der erneuerbaren Energien statt. Bis 2050 sollen sie einen Anteil von mindestens 80 % ausmachen. Von dieser Entwicklung können insbesondere Betreiber virtueller Kraftwerke profitieren. Ihnen bietet sich die Gelegenheit mit dem steigenden Anteil dezentraler, erneuerbarer Erzeugungsanlagen zu wachsen. Vor diesem Hintergrund beziehen sich die folgenden Überlegungen zum Marktwachstum insbesondere auf das Umfeld der erneuerbaren Energien.

---

<sup>39</sup> Vgl. (Ridder, 2003), Seite 11

<sup>40</sup> (Kommission der europäischen Gemeinschaften, 2007), Seite 2

### 2.3.1.1 Marktgröße

Deutsche Elektrizitätsunternehmen konnten im Jahr 2012 Erlöse von ca. 68.027 Milliarden Euro realisieren.<sup>41</sup> Insgesamt wurden in Deutschland 2012 etwa 629,8 Milliarden kWh Strom erzeugt; im Jahr 2013 sogar bereits 633,6 kWh (siehe Tabelle 2).<sup>42</sup>

Energieträger	Mrd. kWh
Braunkohle	162,0
Steinkohle	124,0
Erdgas	66,8
Mineralölprodukte	6,4
Kernenergie	97,3
Erneuerbare Energien	151,7
Sonstige Energieträger	25,4
Insgesamt	633,6

darunter:

Energieträger	Mrd. kWh
Windkraft	53,4
Biomasse	42,6
Photovoltaik	30,0
Wasserkraft	20,5

**Tabelle 2: Bruttostromerzeugung in Deutschland (2013)<sup>43</sup>**

Etwa 57 % des 2013 erzeugten Stroms wurde aus fossilen Energieträgern gewonnen und ca. 15 % aus Kernenergie. Die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern betrug demgegenüber knapp 24 %.

### 2.3.1.2 Marktwachstum

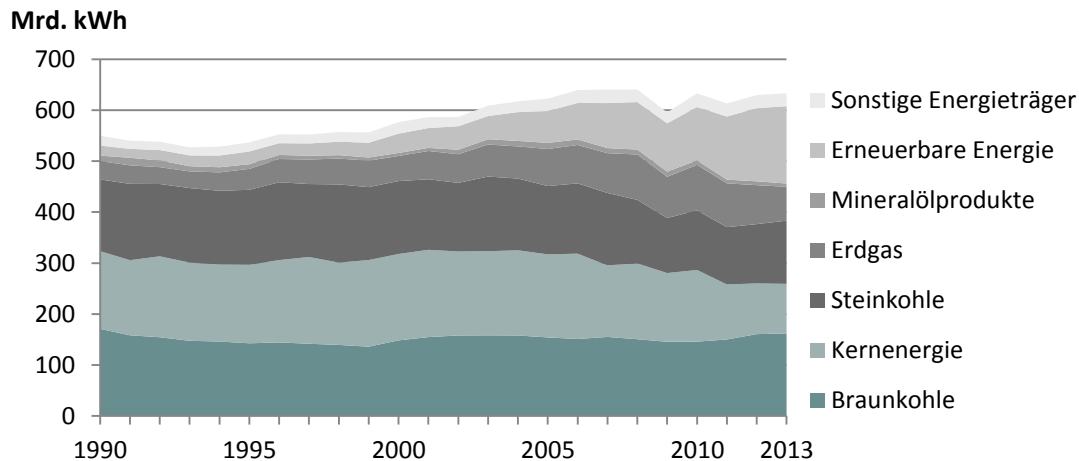
Im Zeitverlauf ist deutlich erkennbar, dass die fossilen Energieträger in den letzten 20 Jahren eine dominante Rolle bei der Stromerzeugung einnahmen (siehe Tabelle 3).<sup>44</sup>

<sup>41</sup> Vgl. (Statista GmbH, 2014)

<sup>42</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)

<sup>43</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)

<sup>44</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)



**Tabelle 3: Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern<sup>45</sup>**

Während der Anteil fossiler Energieträger in den letzten fünf Jahren degressive Tendenzen aufwies, nahm der Anteil erneuerbarer Energien von 2009 bis 2013 um knapp 40 % zu. Dies lässt sich zum einen darauf zurück zu führen, dass erneuerbare Energien den steigenden Strombedarf in Deutschland stützen und zum anderen substituieren sie zunehmend die fossilen und atomaren Energieträger.

Die Windkraft nahm unter den erneuerbaren Energieträgern im Jahr 2013 die führende Rolle ein. Etwa 35 % der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen wurde mittels Windkraft realisiert. Das entspricht etwa 53,4 Milliarden kWh. Zudem wurden 28 % des Bruttostroms aus Biomasse gewonnen. Weitere wichtige erneuerbare Erzeugungsquellen waren Photovoltaik (20 %) und Wasserkraft (14 %).<sup>46</sup>

Gemäß Berechnungen, welche auf der „Studiesynopse Energieprognosen“ des BDEW basieren, könnten die Erwartungen bzgl. des Anteils erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung sogar noch übertroffen werden. Der erzeugte Bruttostrom diente zu knapp 90 % der Deckung des inländischen Strombedarfs (siehe Abbildung 7).<sup>47</sup> Der Rest des Stroms wurde von ausländischen Unternehmen abgenommen. Im Gegenzug bezogen deutsche Energie-

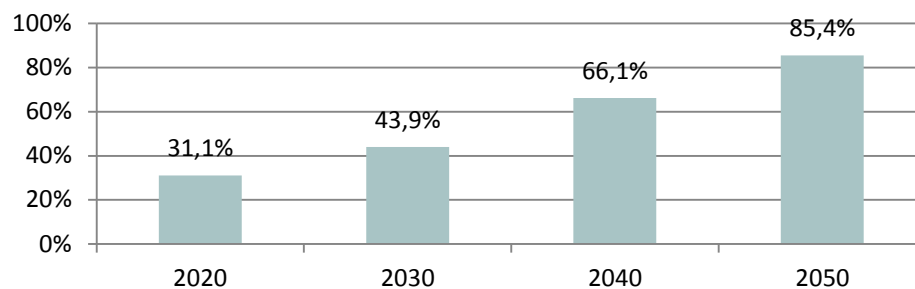
<sup>45</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)

<sup>46</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)

<sup>47</sup> Vgl. (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2010), Seite 35 f.

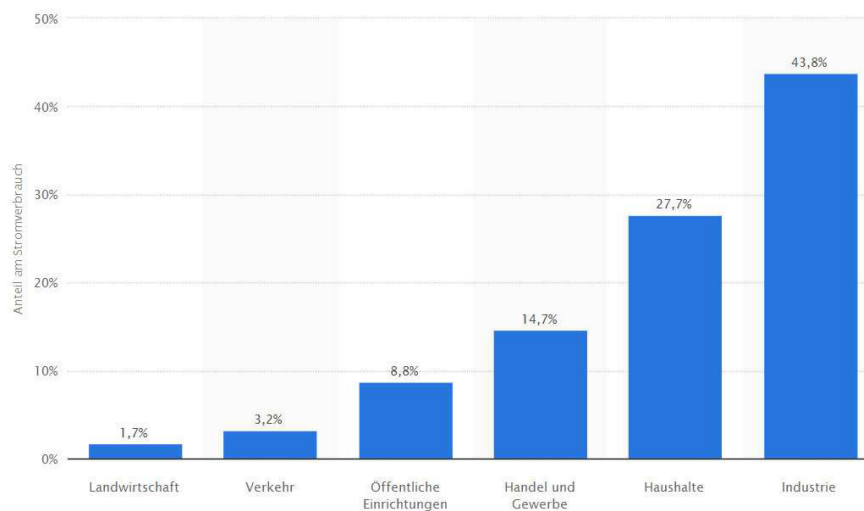


versorger rund 6 % des benötigten Stroms zur Deckung des inländischen Bedarfs aus dem Ausland.<sup>48</sup>



**Abbildung 7: Prognostizierter Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung<sup>49</sup>**

Der Stromverbrauch in Deutschland lässt sich verschiedenen Verbrauchergruppen zuordnen. Den größten Anteil hatte im Jahr 2010 die Industrie mit 43,8 % (siehe Abbildung 8).<sup>50</sup>



**Abbildung 8: Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland (2010)<sup>51</sup>**

Die zweitgrößte Verbrauchergruppe waren private Haushalte mit 27,7 %, gefolgt vom Sektor Handel und Gewerbe mit 14,7 %. Öffentliche Einrichtungen hatten einen Anteil von 8,8 % am Stromverbrauch.

<sup>48</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013c)

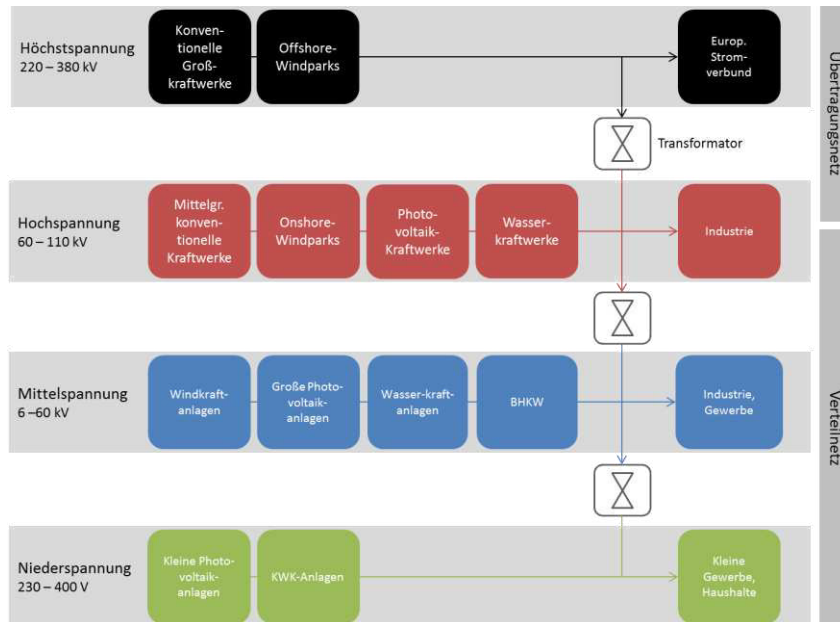
<sup>49</sup> Eigene Berechnungen, in Anlehnung an (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2010), Seite 35 f.

<sup>50</sup> Vgl. (Statista GmbH, 2014)

<sup>51</sup> (Statista GmbH, 2014)

### 2.3.2 Aufbau des Stromnetzes

Die Verteilung des im Kraftwerk erzeugten Stroms wird mittels eines verzweigten Stromnetzes realisiert. Dieses ist in vier Spannungsebenen unterteilt (siehe Abbildung 9).<sup>52</sup>



**Abbildung 9: Struktur des deutschen Stromnetzes**<sup>53</sup>

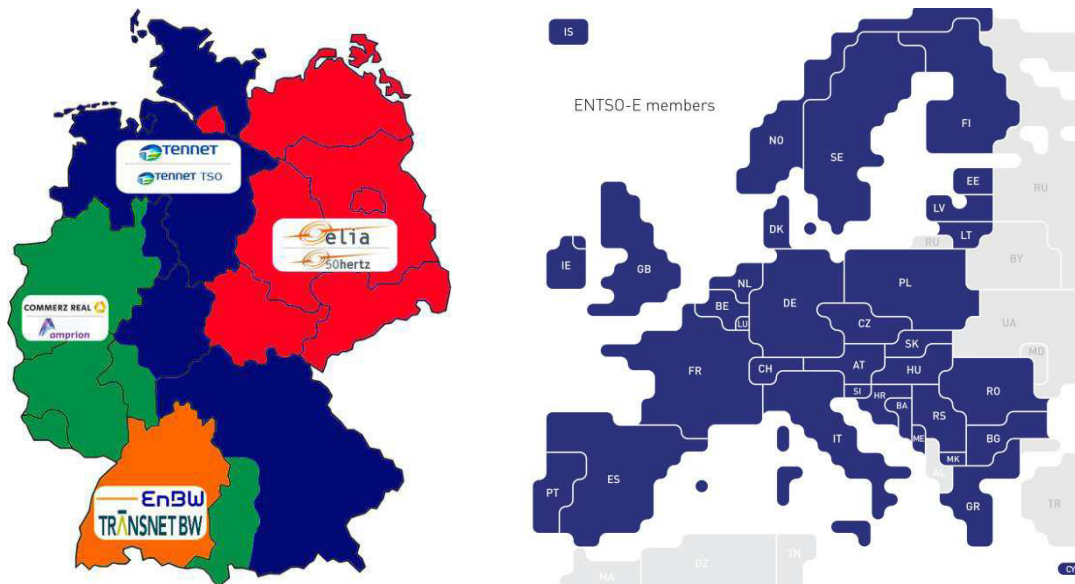
Die Höchstspannungsebene umfasst eine elektrische Spannung von 220 bis 380 kV. Auf ihr speisen vor allem konventionelle Großkraftwerke Strom ins Netz ein, aber auch Offshore-Windparks. Ein Teil des Stroms wird innerhalb des europäischen Stromverbunds gehandelt, der restliche Strom wird mittels Umspannwerken ins Hochspannungsnetz gespeist, welches den Bereich von 60 bis 110 kV umfasst. An die Hochspannungsebene sind mittelgroße konventionelle Kraftwerke und Onshore-Windparks, sowie Photovoltaik- und Wasserkraftwerke angeschlossen. Abnehmer in diesem Spannungsbereich sind große Industrieunternehmen.

Die Hoch- und Höchstspannungsebenen werden in Deutschland von den vier Übertragungsnetzbetreibern *50Hertz Transmission*, *Ampirion*, *TransnetBW* und *TenneT TSO* betrieben. Jeder Übertragungsnetzbetreiber (im Folgenden ÜNB genannt) trägt innerhalb seiner Regelzone die Verantwortung für die Instandhal-

<sup>52</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 3 f.

<sup>53</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Agentur für Erneuerbare Energien e.V., 2011) und (photovoltaik-guide.de, ohne Jahr)

tung, den Netzausbau, sowie der Einhaltung eines ständigen Gleichgewichts von Stromangebot und -nachfrage. Um die auftretenden Über- und Unterkapazitäten besser regulieren zu können haben sich die vier ÜNB zu einem Netzregelverbund zusammengeschlossen (siehe Abbildung 10, links).<sup>54</sup>



**Abbildung 10: Deutsches und kontinentaleuropäisches Verbundnetz<sup>55</sup>**

Die vier Regelzonen des deutschen Netzregelverbunds sind über nationale Kuppelleitungen zusammen geschaltet und geben den ÜNB die Möglichkeit Regelernergie deutschlandweit zu verteilen und Engpässe kostengünstig auszugleichen. Um den internationalen Stromhandel zu ermöglichen ist das deutsche Verbundnetz über weitere Kuppelleitungen auf Höchstspannungsebene in das kontinentaleuropäische Verbundnetz ENTSO-E integriert, welches über 30 Regelzonen umfasst (siehe Abbildung 10, rechts).<sup>56,57</sup>

Auf der Niederspannungsebene (230 bis 400 V) und der Mittelspannungsebene (6 bis 60 kV) speisen die kleineren dezentralen Energieerzeuger, wie z.B. Windkraftanlagen und Blockheizkraftwerke, ihren Strom ins Netz ein. Betrieben werden diese Netze von den Verteilnetzbetreibern (im Folgenden VNB genannt). Diese beginnen ihre Dienstleistung an der Stelle, wo die der ÜNB endet.

<sup>54</sup> Vgl. (TenneT TSO GmbH, ohne Jahr)

<sup>55</sup> (Hottmann, 2013) und (ENTSO-E, 2013)

<sup>56</sup> Vgl. (Amprion GmbH, ohne Jahr b)

<sup>57</sup> Vgl. (ENTSO-E, 2013)

Während die ÜNB deutschland- und europaweit tätig sind, befassen sich die VNB mit dem regionalen Energietransport zum Endverbraucher. Sie stellen den Energieerzeugern und Lieferanten ihre Netze gegen eine Nutzungsgebühr zur Verfügung, um diesen die Belieferung der Verbraucher zu ermöglichen. In Deutschland gibt es über 870<sup>58</sup> Verteilnetzbetreiber, welche üblicherweise zu lokalen oder kommunalen Energieversorgungsunternehmen gehören. Es ist allerdings zu beobachten, dass Kommunen ein vermehrtes Interesse an Rückübertragungen der Verteilnetze entwickeln und diese zurückkaufen.<sup>59</sup>

### **2.3.3 Netzstabilität**

Elektrizität lässt sich derzeit nur in geringen Mengen speichern. Daraus entsteht die Notwendigkeit, dass sich die angebotene und die nachgefragte Strommenge nahezu im Gleichgewicht befinden müssen. Größere Abweichungen zwischen der erzeugten und der nachgefragten Strommenge haben erhebliche Stabilitätsprobleme des Stromnetzes zur Folge.<sup>60</sup>

#### **2.3.3.1 Netzfrequenz und Lastabdeckung**

Die Stabilitätsprobleme im Stromnetz, welche durch ein Ungleichgewicht zwischen nachgefragter und angebotener Strommenge entstehen, liegen darin begründet, dass alle europäischen Kraftwerke mit einer Frequenz von 50 Hertz arbeiten. Sinkt die Frequenz auf unter 47,5 Hertz, weil zu viel Strom nachgefragt wird, können die Generatoren durch auftretende Resonanzschwingungen beschädigt oder zerstört werden. Die Schwingungen beeinflussen zudem zahlreiche elektrische Geräte, welche ihren Strom über das Netz beziehen.

Die Bestimmung der Netzfrequenz von 50 Hertz wurde bereits zwischen dem 19. und 20. Jahrhundert beschlossen und hat im gesamten europäischen Verbundnetz Gültigkeit. Bei Abweichungen von 0,01 Hertz werden bereits automatische Regulierungsmaßnahmen ergriffen (siehe Abbildung 11).<sup>61</sup>

Ursachen für aufkommende Ungleichgewichte innerhalb einer Regelzone können der Ausfall von Erzeugern oder Lasten sein, der Wegfall von Handelsge-

---

<sup>58</sup> Vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011), Seite 4

<sup>59</sup> Vgl. (Bornemann, 2013)

<sup>60</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 3

<sup>61</sup> Vgl. (Amprion GmbH, ohne Jahr a)

schäften oder das Aufkommen nicht prognostizierter Stromerzeugung bzw. -nachfrage.<sup>62</sup>



**Abbildung 11: Schwankungen der Netzfrequenz<sup>63</sup>**

Um die Netzfrequenz seitens der Energieerzeuger stabil zu halten, werden drei Kraftwerkstypen eingesetzt, welche verschiedene Reaktionszeiten bzgl. der Energiebereitstellung haben.

Grundlastkraftwerke decken die Grundversorgung des aufkommenden Energiebedarfs. Der Grundbedarf ist die Menge an Energie, die im Tagesverlauf nicht unterschritten wird und kontinuierlich zur Verfügung stehen muss. In privaten Haushalten entsteht dieser Grundbedarf durch technische Geräte, die dauerhaft ans Stromnetz angeschlossen sind, wie Kühlschränke oder Geräte im Standby-Modus. Zur Deckung der Grundlast werden überwiegend Braunkohle- und Atomkraftwerke eingesetzt, da diese – trotz hoher Investitionskosten – verhältnismäßig geringe Brennstoffkosten verursachen. Bedingt durch ihre langsame Regelfähigkeit können Grundlastkraftwerke unerwartete Lastspitzen oder tageszeitbedingte Nachfrageschwankungen nicht ausgleichen. Das An- und Abschalten eines solchen Kraftwerks kann unter Umständen mehrere Tage dauern und wird von den Energiekonzernen aus Kostengründen möglichst vermieden. Für den Fall, dass der nächtliche Strombedarf unter der Grundlast des Kraftwerks liegt, kommen verschiedene Energiespeicher zum Einsatz, welche den überschüssigen Strom temporär aufnehmen.<sup>64,65</sup>

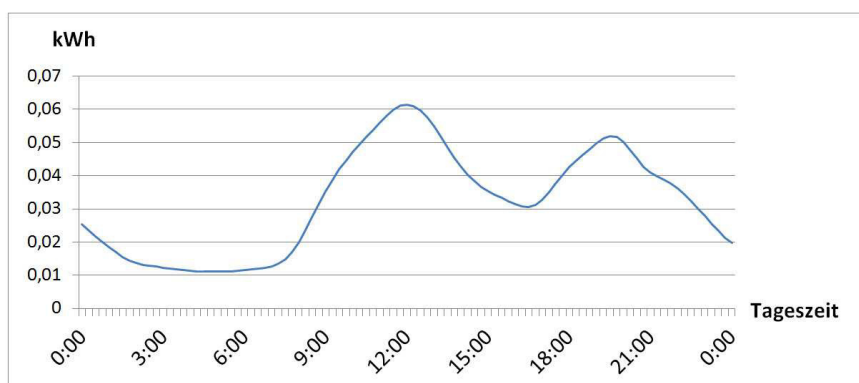
<sup>62</sup> Vgl. (Berndt, Hermann, Kreye, Reinisch, Scherer, & Vanzetta, 2007), Seite 10-11

<sup>63</sup> (Amprion GmbH, ohne Jahr a)

<sup>64</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 5

Zur Deckung der kurzzeitigen Lasterhöhungen, welche Werktags vorwiegend in der Zeit zwischen 6 und 24 Uhr auftreten, kommen die flexibleren Mittellastkraftwerke zum Einsatz. Häufig handelt es sich dabei um Steinkohle und Gasturbinenkraftwerke, jedoch nimmt der Anteil von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien zur Deckung der Mittellast zu. Mittellastkraftwerke sind in der Lage eine über mehrere Stunden konstante Energienachfrage, die über den Grundbedarf hinausgeht, abzudecken. Aufgrund ihrer schnellen Regelfähigkeit sind sie in Deutschland weit verbreitet.

In den Zeiten vorhersehbarer Lastspitzen, welche im Mittel zwischen sieben und 12 Uhr, wie auch zwischen 16 und 20 Uhr auftreten, kommen Spitzenlastkraftwerke zum Einsatz.<sup>66</sup> Unter anderem haben private Haushalte, als zweitgrößte Verbrauchergruppe, zu diesen Zeiten regelmäßig einen erhöhten Stromverbrauch und sind Mitverursacher dieser Lastspitzen (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12: Lastprofil privater Haushalte in Niedersachsen (01.12.2013)<sup>67</sup>**

Die Lastprofile der Verbrauchergruppen sind jedoch von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Lastspitzen an Werktagen decken sich beispielsweise nicht mit denen an Wochenenden. Ebenso ist der Strombedarf in Wintermonaten deutlich höher als im Sommer.<sup>68</sup>

Spitzenlastkraftwerke, zu welchen unter anderem Gasturbinen- und Pumpspeicherkraftwerke (siehe 3.2.3) zählen, sind in der Lage binnen Minuten oder sogar Sekunden Strom ins öffentliche Netz einzuspeisen. Da Lastspitzen in ver-

<sup>65</sup> Vgl. (Graßl, Kemfert, Lücking, Müller, & Willenbacher, ohne Jahr)

<sup>66</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009)

<sup>67</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (E.ON Mitte AG, 2013)

<sup>68</sup> Vgl. (E.ON Mitte AG, 2013)

hältnismäßig geringem Umfang auftreten, haben diese Kraftwerke lange Stillstandzeiten, sowie relativ hohe Betriebskosten.<sup>69</sup>

Um die Energieerzeugung und den -verbrauch deutschlandweit koordinieren zu können, werden die Versorgungsgebiete in verschiedene Bilanzkreise unterteilt, welche versuchen ihre eigene Energiebilanz im Gleichgewicht zu halten.

### **2.3.3.2 Bilanzkreise**

Innerhalb des deutschen Netzregelverbunds werden organisatorische Einheiten gebildet, die sogenannten Bilanzkreise. Das Bundesministerium der Justiz definiert in § 3 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) einen Bilanzkreis innerhalb einer Regelzone als „Zusammenfassung von Einspeise- und Entnahmestellen, die dem Zweck dient, Abweichungen zwischen Einspeisungen und Entnahmen durch ihre Durchmischung zu minimieren und die Abwicklung von Handelstransaktionen zu ermöglichen“.<sup>70</sup> Gemäß § 4 der Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) muss ein Bilanzkreis aus mindestens einer Einspeise- oder Entnahmestelle bestehen. Zudem muss von den bilanzkreisbildenden Netznutzern ein Verantwortlicher benannt werden, welcher für eine ausgeglichene Bilanz zwischen Stromeinspeisungen und -entnahmen innerhalb seines Bilanzkreises zuständig ist. Der Bilanzkreisverantwortliche hat, entsprechend der erwarteten Netzauslastung, einen Fahrplan im Viertelstundenraster für den Strombedarf des jeweiligen Folgetages zu kalkulieren.<sup>71</sup> Ein Fahrplan gibt an, „wie viel elektrische Leistung in jeder Zeiteinheit zwischen den Bilanzkreisen ausgetauscht wird oder an einer Einspeise- oder Entnahmestelle eingespeist oder entnommen wird“<sup>72</sup>. Das Ziel der Fahrplanerstellung ist es, über ausgeglichene Bilanzkreise eine ausgeglichene Bilanz der gesamten Regelzone zu erreichen.<sup>73</sup>

Kommt es gegenüber der prognostizierten Netzauslastung zu Fahrplanabweichungen, so wird die Unter- bzw. Überversorgung durch den Netzbetreiber des jeweiligen Bilanzkreises, den sogenannten Regelzonenführer, ausgeglichen. Der Regelzonenführer erhebt für seine Regelaufgabe ein in Relation zur Abwei-

---

<sup>69</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 5

<sup>70</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2013a), §3 (2)

<sup>71</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2013b), §4

<sup>72</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2013b), §2

<sup>73</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2013b), §5 (1)

chung stehendes Entgelt. Bei der Erhebung des Entgeltes wird hinsichtlich der Abweichung zwischen Energielieferung und -bezug unterschieden.<sup>74</sup> Bilanzkreise, welche zu viel Energie liefern, gleichen zunächst die Defizite anderer Bilanzkreise aus, um ein Gleichgewicht in der Regelzone zu erreichen. Die fließenden Energiemengen zwischen den Bilanzkreisen innerhalb der Regelzone werden als Ausgleichsenergie bezeichnet. Ist die Regelzone trotz der eingesetzten Ausgleichsenergie nicht im Gleichgewicht, muss dieses durch den Einsatz von Regelenergie hergestellt werden (siehe 2.3.3.3).

Während sich im deutschen Teil des Versorgungsgebietes der TenneT TSO derzeit ca. 1900 Bilanzkreise<sup>75</sup> befinden, gibt es in der Regelzone der Amprion etwa 2030<sup>76</sup> und in der Regelzone der TransnetBW ca. 1510<sup>77</sup>. Zum Regelgebiet der 50hertz liegen keine Angaben vor.

Stromerzeugungsanlagen im Sinne des EEG werden aus den Bilanzkreisen herausgerechnet und bilden einen eigenen regelzonenübergreifenden Bilanzkreis. Dieser wird anhand eines festgelegten Schlüssels auf die vier Regelzonen umgewälzt, da Regelzonen mit hohem EEG-Einspeisungsanteil sonst finanziell benachteiligt wären.<sup>78</sup>

Netzbetreiber, welche in ihrer Regelzone weniger als 100.000 Kunden versorgen, sind von der Führung eines eigenen Bilanzkreises für Energien im Sinne EEG ausgenommen.<sup>79</sup>

### **2.3.3.3 Regelenergie**

In § 3 der Stromnetzzugangsverordnung ist Regelenergie definiert als „diejenige Energie, die zum Ausgleich von Leistungsungleichgewichten in der jeweiligen Regelzone eingesetzt wird“. Ziel dieser Regelung ist es, eine stabile Netzfrequenz von 50 Hertz zu gewährleisten (siehe 2.3.3.1).<sup>80</sup> Wird eine unvorhersehbare erhöhte Stromnachfrage durch Regelenergie ausgeglichen, so wird diese als positive Regelenergie bezeichnet. Wird hingegen zu wenig Strom nachge-

---

<sup>74</sup> Vgl. (Kleimaier, 2008), Seite 75

<sup>75</sup> Vgl. (TenneT TSO GmbH, 2013)

<sup>76</sup> Vgl. (Amprion GmbH, 2013)

<sup>77</sup> Vgl. (TransnetBW, 2013)

<sup>78</sup> Vgl. (Kleimaier, 2008), Seite 75

<sup>79</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2013b), § 11

<sup>80</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2013b), §3



fragt, ist die Netzstabilität ebenso gefährdet und die ÜNB müssen Strom aus dem Netz nehmen. Diese negative Regelenergie wird erbracht, indem beispielsweise Kraftwerke ausgeschaltet oder Stromverbraucher gezielt eingeschaltet werden.

Derzeit stellen die ÜNB einen großen Teil der Regelenergie durch eigene Stromkonzerne selbst zur Verfügung. In Zukunft ist jedoch ein zunehmender Anteil von Kleinanlagenbetreibern zu erwarten, welche den Regelenergiemarkt als Handelsplattform nutzen.<sup>81</sup>

### **2.3.4 Stromgestehungskosten**

Ein Kraftwerk verursacht vor, während und nach der Betriebszeit verschiedene Arten von Kosten, welche sich in externe und interne Kosten unterscheiden lassen. Die internen Kosten fallen im Rahmen der Betriebsführung der Energieerzeugungsanlagen an, während sich die externen Kosten auf betriebsfremde Auswirkungen der Energieerzeugung beziehen.<sup>82</sup>

#### **2.3.4.1 Interne Kosten**

Die internen Kosten lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Investitionskosten
- Betriebskosten
- Abriss- und Rückbaukosten<sup>83</sup>

Investitionskosten umfassen sämtliche Kosten, die von der Planung und Errichtung der Energieerzeugungsanlage, bis hin zur Erstinbetriebnahme anfallen. Dies umfasst ebenso die Kosten sämtlicher dazugehöriger Peripherie, sowie die Anbindung ans Stromnetz. Neben den Baukosten zählen auch die Bauherreneigenleistungen zu den Investitionskosten. Diese setzen sich unter anderem aus Kosten für Genehmigungsverfahren, die Bereitstellung einer Infrastruktur und des Grundstücks, sowie den Kosten für die Erstinbetriebnahme zusammen.<sup>84</sup>

---

<sup>81</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, 2013)

<sup>82</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 137 f.

<sup>83</sup> Vgl. (Schneider, 1998), Seite 14 ff.

<sup>84</sup> Vgl. (Schneider, 1998), Seite 15

Den Betriebskosten werden zum einen die fixen Kosten für Personal, Wartung, Instandhaltung, Steuern und Versicherungen zugerechnet und zum anderen die variablen Kosten, welche vor allem für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe anfallen. Hierzu zählen auch die Kosten für die Primärenergiebeschaffung und die Entsorgung von Brennstoffrückständen und Umwandlungsprodukten.<sup>85</sup>

Zu den Abriss- und Rückbaukosten zählen alle Kosten, die beim Abbau einer Energieerzeugungsanlage anfallen. Dies ist besonders für die Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien relevant, da diese zum Teil eine in die Baugenehmigung verankerte, beschränkte Einsatzzeit haben. Im Falle von Windkraftanlagen beträgt diese in Deutschland 20 Jahre. Nach Ablauf dieser Frist muss die Anlage abgerissen und das Grundstück in seinen ursprünglichen Zustand versetzt werden, sofern keine Nutzungsverlängerung beantragt und genehmigt wird.<sup>86</sup>

Werden die internen Stromgestehungskosten von konventionellen Kraftwerken und die erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen über einen Zeitraum von 40 Jahren betrachtet, ist erkennbar, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht unweigerlich kostengünstiger ist. Wie zu Beginn des Abschnitts bereits erwähnt, wurden in den vergangenen Jahrzehnten zu einem großen Anteil Braun- und Steinkohle für die Stromerzeugung herangezogen. Diese weisen verhältnismäßig geringe Stromgestehungskosten auf und sind den erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen gegenüber auch in den nächsten vier Jahrzehnten noch konkurrenzfähig.<sup>87</sup>

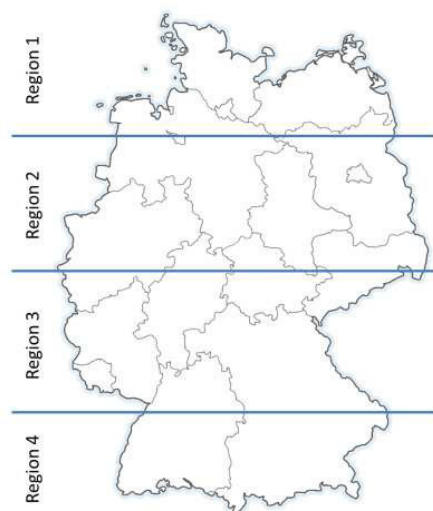
Um regionale Unterschiede bzgl. der Stromgestehungskosten identifizieren zu können, wurden bei der im Folgenden zugrunde gelegten Datenerhebung, welche von der Prognos AG im Oktober 2013 durchgeführt wurde, vier Regionen unterschieden (siehe Abbildung 13).

---

<sup>85</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 137

<sup>86</sup> Vgl. (Bundesverband WindEnergie e.V., ohne Jahr)

<sup>87</sup> Vgl. (Prognos AG, 2013), Seite 44 f.



**Abbildung 13: Regionale Einteilung der Stromgestehungskosten<sup>88</sup>**

Unter den Anlagen für erneuerbare Energieerzeugung heben sich besonders die Onshore-Windanlagen, trotz ihrer höheren Investitionskosten, durch ihre deutschlandweit durchschnittlich geringen Stromgestehungskosten von 7,2 Cent pro kWh hervor (siehe Tabelle 4). In Norddeutschland sind sie mit durchschnittlich 5,9 Cent pro kWh besonders wettbewerbsfähig. Je südlicher sich die Onshore-Anlagen befinden, desto höhere Stromgestehungskosten sind zu erwarten, da die Windstärke landeinwärts abnimmt. So sind sie an Schwachwindstandorten im Süden Deutschlands mit 8,7 Cent pro kWh vergleichsweise hoch, da dort die geringsten Erträge erwirtschaften werden.

	Braun- kohle	Stein- kohle	Erdgas GUD	Erdgas GT	PV Dach	PV Frei- fläche	Wind Onshore	Bio- masse	Biogas
<b>Region 1</b>	-	8,2	9,3	15,6	13,0	9,2	5,9	11,3	14,7
<b>Region 2</b>	5,6	8,2	9,3	15,6	12,3	8,5	6,6	11,3	14,7
<b>Region 3</b>	5,6	8,4	9,3	15,6	11,6	8,1	7,7	11,3	14,7
<b>Region 4</b>	-	8,6	9,3	15,6	11,1	7,5	8,7	11,3	14,7
<b>Ø</b>	<b>5,6</b>	<b>8,4</b>	<b>9,3</b>	<b>15,6</b>	<b>12,0</b>	<b>8,3</b>	<b>7,2</b>	<b>11,3</b>	<b>14,7</b>

**Tabelle 4: Mittlere Stromgestehungskosten der Erzeugungsarten über einen Zeitraum von 40 Jahren (in Cent / kWh)<sup>89</sup>**

Eine zweite Alternative zu den konventionellen Kraftwerken bieten Photovoltaikanlagen, welche auf Freiflächen installiert sind. Mit durchschnittlich 8,3 Cent

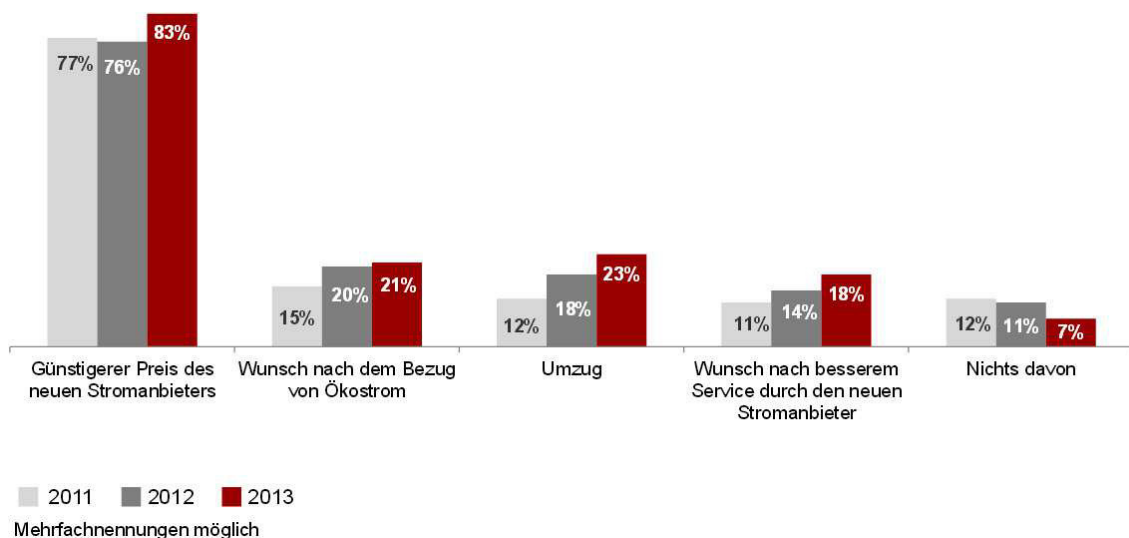
<sup>88</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Prognos AG, 2013), Seite 44

<sup>89</sup> Vgl. (Prognos AG, 2013), Seite 44

pro kWh bieten sie eine ideale Alternative zu den 0,1 Cent pro kWh teureren Steinkohlekraftwerken. Der Aufschwung der Photovoltaikanlagen lässt sich zum einen auf sinkende Systemkosten zurückführen und zum anderen auf steigende Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate und Rohstoffe.

Nachteilig ist jedoch der volatile Energieertrag dieser erneuerbaren Energieerzeugung, welcher durch gezielte Steuerung, beispielsweise durch die Integration der Anlagen in ein VK, ausgeglichen werden muss.<sup>90</sup>

Aus den internen Energiegestehungskosten ergibt sich – zusammen mit Steuern und sonstigen Abgaben, sowie einem kalkulatorischen Gewinn – der Energiepreis am Markt.<sup>91</sup> Dieser spielt insbesondere für den Verbraucher eine Rolle, für welchen der Strompreis in den letzten drei Jahren das zentrale Entscheidungskriterium bei der Wahl des Stromanbieters darstellte (siehe Abbildung 14).



**Abbildung 14: Mögliche Gründe für einen Wechsel des Stromanbieters**

Im Jahr 2013 war für 83 % der befragten Verbraucher ein günstiger Preis des neuen Stromanbieters ein möglicher Wechselgrund, während der Wunsch nach Ökostrom nur für 21 % relevant war. Um die Energiewende erfolgreich umzusetzen, müssen die Ökostromtarife für den Verbraucher attraktiver gestaltet werden um die Wechselbereitschaft zu erhöhen.

<sup>90</sup> Vgl. (Prognos AG, 2013), Seite 44 f.

<sup>91</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 137

#### 2.3.4.2 Externe Kosten

Der Betrieb von Energieerzeugungsanlagen hat Auswirkungen auf die Umwelt, das Klima, die Gesellschaft und auf die Menschen, die in ihr leben. Die Kosten, welche durch die schädlichen Auswirkungen der Energieerzeugung entstehen und in Zukunft noch zu erwarten sind, werden als externe Kosten bezeichnet. Sie treten vor allem durch den Einsatz fossiler und atomarer Brennstoffe in Form von Umwelt-, Klimafolge- und Gesundheitsschäden auf. Aber auch regenerative Energieerzeugung verursacht externe Kosten, welche hingegen deutlich geringer ausfallen (siehe Tabelle 5).

Energieträger	Cent pro kWh
Braunkohle	8,7
Steinkohle	6,8
Heizöl	6,1
Erdgas	3,9
Photovoltaik (3 kW)	0,8
Wasserkraft (330 kW)	0,4
Windkraft Onshore (800 kW)	0,1

**Tabelle 5: Externe Stromgestehungskosten<sup>92</sup>**

Während fossile Energieträger mit 3,9 bis 8,7 Cent pro kWh faktisch im einstelligen Cent-Bereich liegen, verursachen erneuerbare Energieträger mit 0,1 bis 0,8 Cent pro kWh deutlich geringere externe Kosten.

Die entstandenen und zu erwartenden externen Kosten werden von den Energieerzeugern nicht in vollem Umfang ausgeglichen und müssen infolgedessen von der Gesellschaft getragen werden.<sup>93</sup>

#### 2.3.5 Stromhandel

Jeder Anlagenbetreiber kann frei entscheiden ob und an wen er seinen Strom veräußert. Der Verkauf kann an der Börse, auf dem Regelenergiemarkt oder an private und industrielle Direktabnehmer sowohl mit als auch ohne Anbindung an das öffentliche Netz erfolgen. Die verschiedenen Handelsmöglichkeiten werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

---

<sup>92</sup> (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 139

<sup>93</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 137 f.

### **2.3.5.1 Regelenergiemarkt**

Gemäß § 22 EnWG sind die ÜNB sind für die Beschaffung der Regelenergie zuständig. Diese muss diskriminierungsfrei und transparent über ein anonymisiertes, regelzonenübergreifendes Ausschreibungsverfahren auf einer Internetplattform erfolgen.<sup>94</sup> Die vier deutschen ÜNB haben zu diesem Zweck eine gemeinsame Handelsplattform im Internet ([www.regelleistung.net](http://www.regelleistung.net)) etabliert. Auf dieser können zudem die Teilnahmebedingungen am Handel eingesehen werden.<sup>95</sup>

Die Ausschreibung der Regelenergiearten erfolgt getrennt nach Primär- und Sekundärregelleistung, nach Minutenreserve und sonstigen Regelenergieprodukten. Die Primär- und Sekundärregelung werden jeweils wöchentlich ausgeschrieben und Minutenreserve werktäglich. Um etwaige Netzschwankungen jederzeit ausgleichen zu können, müssen 4.500 bis 6.000 MW Regelenergie verfügbar sein. Diese wird derzeit von 53 zugelassenen Lieferanten bereitgestellt. Für das alleinige Vorhalten der Regelenergie erhält der Lieferant einen Leistungspreis. Wird die Regelleistung tatsächlich benötigt, wird darüber hinaus ein Arbeitspreis pro kWh berechnet. Dieser liegt, trotz starker Preisschwankungen, in der Regel weit über dem Börsenpreis und den EEG-Vergütungen.<sup>96</sup>

### **2.3.5.2 Börsenhandel an der EEX**

Die European Energy Exchange (EEX) in Leipzig ist ein internationaler Marktplatz, auf welchem 24 Länder mit über 236 Teilnehmern operieren, und die größte Handelsbörse für in Deutschland erzeugten Strom. 34 % der Handelsteilnehmer stammen aus Deutschland.<sup>97</sup> Neben Strom werden an den Märkten der EEX „Erdgas, CO<sub>2</sub>-Emissionsberechtigungen, Kohle und Herkunftsnachweise für Grünstrom gehandelt“<sup>98</sup>.

Der Handel an der EEX ist auf dem Spotmarkt und dem Terminmarkt möglich. Der Terminmarkt dient der Abwicklung von Handelsgeschäften die in der Zukunft liegen (Optionen und Futures). Die finanzielle oder physische Erfüllung

---

<sup>94</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2013a), § 22

<sup>95</sup> Vgl. (ASUE, 2010), Seite 22

<sup>96</sup> (Next Kraftwerke GmbH, 2013)

<sup>97</sup> Vgl. (European Energy Exchange AG, 2014), Seite 2

<sup>98</sup> (European Energy Exchange AG, 2014), Seite 3

findet zu einem späteren, vorab festgelegten Zeitpunkt statt. Durch den Handel am Terminmarkt lassen sich Preisänderungsrisiken absichern. Im Jahr 2013 wurden auf dem Terminmarkt der EEX ca. 1.264 TWh Strom gehandelt.

Während der Terminmarkt in Leipzig abgewickelt wird, befindet sich der Spotmarkt (auch EPEX SPOT genannt) in Paris. Der Spotmarkt dient der Abwicklung kurzfristiger Handelsgeschäfte, deren physische Erfüllung am selben Tag (Intraday) oder am Folgetag (Intraday und Day-Ahead) stattfinden. Im Jahr 2013 wurden auf dem Spotmarkt ca. 346 TWh gehandelt.<sup>99</sup>

### **2.3.5.3 Regionale Direktvermarktung**

Erzeuger haben die Möglichkeit den produzierten Strom direkt an Abnehmer aus der Region zu veräußern. Dies kann über öffentliche oder über private Leitungen stattfinden, wobei letztere keiner EEG-Förderung unterliegen. Mögliche Abnehmer sind Landwirtschafts- und Verkehrsbetriebe, öffentliche Einrichtungen, Handels- und Gewerbeunternehmen, private Haushalte oder die Industrie.<sup>100</sup>

### **2.3.6 Vergütungsmodelle nach dem EEG**

Wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt, ist das EEG ein zentrales Instrument zur Umsetzung der Energiewende, da es die Förderung erneuerbarer Energien festlegt. Die Betreiber von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie im Sinne des EEG haben dadurch einen Anspruch auf die unverzügliche Anbindung ihrer Anlage an das Stromnetz und die vorrangige Abnahme des erzeugten Stroms.<sup>101</sup>

Im Rahmen des EEG stehen dem Anlagenbetreiber vier Vergütungsmodelle zur Verfügung: Festpreisstrategie, Marktprämienmodell, Grünstromprivileg oder sonstige Direktvermarktung. Die Vermarktungsform wird vom Anlagenbetreiber jeweils für einen Monat festgelegt.<sup>102</sup> Sofern KWK-Anlagen nicht nach dem EEG vergütet werden, kommt das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz zur Anwen-

---

<sup>99</sup> Vgl. (European Energy Exchange AG, 2014), Seite 12

<sup>100</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr a)

<sup>101</sup> Vgl. (R2B ENERGY CONSULTIN, 2013)

<sup>102</sup> Vgl. (R2B ENERGY CONSULTIN, 2013), Seite 12

dung.<sup>103</sup> Da der Betrieb von Erzeugungsanlagen mit fossilen Brennstoffen nicht zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind, wird auf dieses Gesetz nicht näher eingegangen.

### 2.3.6.1 Festpreisvergütung

Im Rahmen der Festpreisvergütung wird der Vergütungssatz pro kWh über einen Zeitraum von 20 Jahren festgelegt und ist abhängig von dem Standort, der Art und der Größe der Anlage. Die Vergütungssätze unterliegen dabei einer monatlichen Degression (siehe Abbildung 15).<sup>104</sup>

Inbetriebnahme	bis 10 kW	bis 40 kW	bis 1 MW	bis 10 MW
ab 01.01.2013	17,02	16,14	14,40	11,78
...	...	...	...	...
ab 01.01.2014	13,68	12,98	11,58	9,47
ab 01.02.2014	13,55	12,85	11,46	9,38
ab 01.03.2014	13,41	12,72	11,35	9,28
ab 01.04.2014	13,28	12,60	11,23	9,19

**Abbildung 15: Vergütungssätze für Photovoltaikanlagen in Cent pro kWh<sup>105</sup>**

Je später eine Anlage in Betrieb genommen wird, desto geringer fällt der feste Vergütungssatz aus. Während Betreibern, welche ihre Photovoltaik-Dachanlage bis zu einer Nennleistung von 10 kW im Januar 2013 in Betrieb nahmen, in den nächsten 20 Jahren 17,02 Cent pro kWh gezahlt werden, bekommen Betreiber im Januar 2014 nur noch 13,28 Cent pro kWh.

Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber (siehe Abschnitt 2.3.2) wurden 2009 im Rahmen der Ausgleichsmechanismusverordnung (AusglMechV) beauftragt, den erzeugten Strom abzunehmen und ihn am „vortägigen oder untertägigen Spotmarkt einer Strombörse (zu) vermarkten“<sup>106</sup> (siehe Abschnitt 2.3.5.2). Da die ÜNB an der Strombörse in der Regel einen geringeren Preis erzielen, als sie dem Erzeuger bezahlt haben, bekommen sie die Differenz über die EEG-Umlage erstattet, welche von den Verbrauchern getragen wird.<sup>107</sup>

<sup>103</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2002), § 2

<sup>104</sup> Vgl. (Bundesverband WindEnergie e.V., ohne Jahr)

<sup>105</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Bundesnetzagentur, 2014)

<sup>106</sup> (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

<sup>107</sup> Vgl. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)



Da der Anteil des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien in den letzten Jahren stark gestiegen ist (siehe Abschnitt 2.3.1.2), haben sich die Kosten für die EEG-Umlage deutlich erhöht. Dies liegt zum einen daran, dass die steigende Anzahl an Anlagen die Strommenge, und somit die gezahlten EEG-Umlagen, erhöht und zum anderen die Strompreise durch das große Angebot an der Börse sinken. Dadurch wird der Anteil, welcher über die EEG-Umlage finanziert wird, wiederum erhöht.<sup>108</sup> Hinzu kommen Subventionen für Industrieunternehmen um sie im internationalen Wettbewerb zu stärken, welche wiederum von den Verbrauchern als Gesamtheit getragen werden. Die 700 größten Industriekunden beteiligen sich zu lediglich 0,3 % an den EEG-Kosten, während sie 18 % des Stroms beziehen. Insgesamt erhalten etwa 23.000 deutsche Unternehmen subventionierten Strom ohne international tätig zu sein.<sup>109</sup>

### 2.3.6.2 Marktprämienmodell

Zur Förderung der Marktintegration erneuerbarer Energien wurde im Januar 2012 das Marktprämienmodell in das EEG aufgenommen. Es fördert Anlagenbetreiber, die von der Festpreisvergütung des Stroms zu einer Direktvermarktung im Sinne des EEG wechseln.<sup>110</sup> Der Strom kann sowohl an der Börse, als auch auf außerbörslichen Märkten gehandelt werden.<sup>111</sup>

Da der vom Anlagenbetreiber erzielte Marktpreis in der Regel unter der Festpreisvergütung des EEG liegt, wird die Differenz durch die sogenannte Marktprämie ausgeglichen.<sup>112</sup>

Die Marktprämie wird gemäß der Anlage 4 des EEG folgendermaßen ermittelt:

$$\text{Marktprämie} = \text{Festpreisvergütung} - \text{Referenzmarktwert}$$

Der Referenzmarktwert ist der *"rückwirkend berechnete tatsächliche Monatsmittelwert des energieträgerspezifischen Marktwerts in Cent pro Kilowattstunde"*<sup>113</sup> abzüglich einer Managementprämie (siehe Abbildung 16).<sup>114</sup>

---

<sup>108</sup> Vgl. (trurnit Gruppe GmbH, 2013)

<sup>109</sup> Vgl. (Osterkorn & Petzold, 2012), Seite 92

<sup>110</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr b)

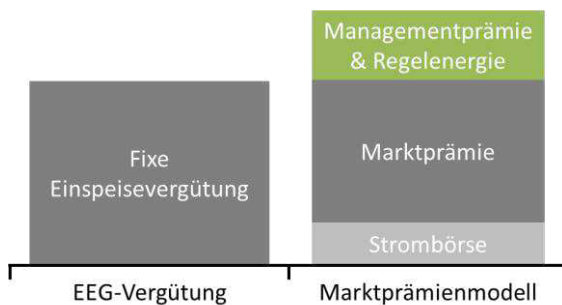
<sup>111</sup> Vgl. (R2B ENERGY CONSULTIN, 2013), Seite 13

<sup>112</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr b)

<sup>113</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2012), Anlage 4

<sup>114</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2012), Anlage 4

Die Höhe der Managementprämie ist abhängig vom Energieträger und soll den Anlagenbetreiber für das erhöhte finanzielle Risiko und den Mehraufwand, welche ihm durch die Direktvermarktung entstehen, entschädigen.



**Abbildung 16: Marktprämienmodell<sup>115</sup>**

Im Rahmen des Marktprämienmodells sind die Erzeuger erneuerbarer Energien, ebenso wie konventionelle Erzeuger, verpflichtet Einspeiseprognosen zu erstellen, sowie etwaige Kosten für Ausgleichsenergie zu tragen. Jedoch ist die Prognoseerstellung bei erneuerbaren Energien deutlich komplexer, da es sich um volatile Energiequellen handelt. Für den Anlagenbetreiber hat die Managementprämie gegenüber der Festpreisvergütung den Vorteil, dass er durch verlässliche Prognosen höhere Einnahmen erzielen kann.

Anlagenbetreiber zur Erzeugung erneuerbarer Energien werden durch das Marktprämienmodell wirtschaftlich motiviert selbstständig am Energiemarkt zu handeln und in den Wettbewerb mit konventionellen Erzeugern zu treten.<sup>116</sup>

Im Falle einer regionalen Direktvermarktung wird das Konzept des Marktprämienmodells abgewandelt. In diesem Fall wird der Strom nicht an der Strombörse veräußert, sondern an industrielle und private Abnehmer aus der Region. Die Marktprämie und Managementprämie werden weiterhin gezahlt, jedoch wird anstelle des Börsenpreises der Endkundenstrompreis herangezogen, welcher ca. 50 % Steuern und Abgaben beinhaltet. Durch stromsteuerrechtliche Vorteile ist es dem Erzeuger erneuerbarer Energien unter bestimmten Voraussetzungen möglich durch die regionale Direktvermarktung zusätzliche Erlöse zu erzielen.<sup>117</sup>

<sup>115</sup> (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr b)

<sup>116</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr c)

<sup>117</sup> Vgl. (Next Kraftwerke GmbH, ohne Jahr d)

### **3 Das virtuelle Kraftwerk**

Die Gewährleistung der Netzstabilität bei einer Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken ist, wie in den vorherigen Kapiteln bereits beschrieben, nur durch die Bildung von Bilanzkreisen und des Einsatzes von Regelenergie zu bewerkstelligen. Die Zunahme an volatilen Energiequellen, welche durch viele kleine dezentrale Erzeuger erschlossen werden, wird dieses Problem in Zukunft verstärken. Ein Lösungsansatz dieses Problems bieten virtuelle Kraftwerke, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden.

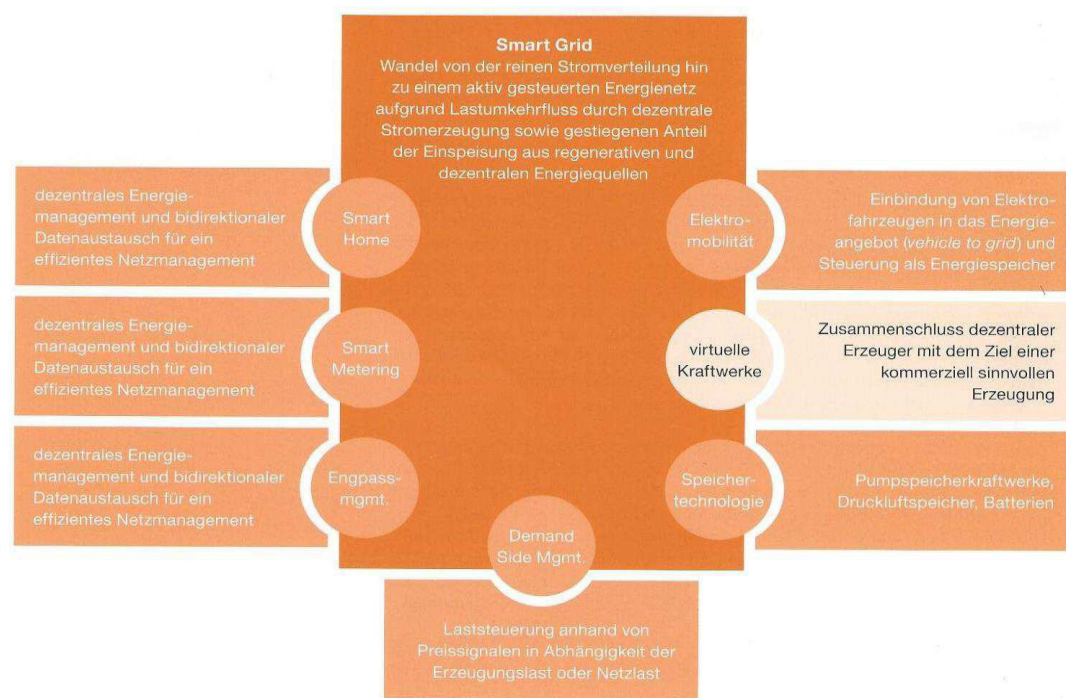
#### **3.1 Smart Grids**

Ein Smart Grid ist ein intelligentes Energienetzwerk, welches das Einspeise- und Verbrauchsverhalten der im Netzwerk befindlichen Teilnehmer aktiv überwacht und koordiniert. Dies ermöglicht eine verbesserte Integration regenerativer Energiequellen in das Stromnetz. Das VK als Teil des Smart Grids (siehe Abbildung 17), übernimmt die Aufgabe dezentrale Erzeuger zusammenzuschließen und so zu vernetzen, dass der Lastfluss im Energiesystem optimiert und das Netz stabil gehalten wird. Für den Betreiber steht dabei die Wirtschaftlichkeit des VK im Vordergrund.

Der Verbraucher profitiert in zweierlei Weise vom Konzept des Smart Grids. Zum einen wird, trotz der Lastschwankungen durch viele kleine Erzeuger, die Versorgungssicherheit gewährleistet und zum anderen kann er seinen Nutzen aus dem bezogenen Strom durch den bidirektionalen Datenaustausch innerhalb des Netzwerks erhöhen, indem er durch den Bezug des vergünstigten Stroms seine Kosten reduziert. Ermöglicht wird ihm diese Nutzenmaximierung durch Smart Metering und das Smart Home.<sup>118</sup>

---

<sup>118</sup> Vgl. (BDEW und ZVEI, 2012), Seite 6



**Abbildung 17: Aufbau eines Smart Grids**<sup>119</sup>

Beim Smart Metering wird der analoge Stromzähler des Konsumenten durch einen intelligenten ersetzt, den sogenannten Smart Meter. Dieser übermittelt Messdaten automatisch zum Netzbetreiber und ist in der Lage verschiedene Stromtarife zu speichern. Der Konsument kann seine Verbrauchsdaten zeitnah abrufen und seinen Stromverbrauch anpassen.<sup>120</sup> Der Einbau von „Messeinrichtungen [...], die den tatsächlichen Energieverbrauch und die tatsächliche Nutzungszeit widerspiegeln“<sup>121</sup> ist seit dem Jahr 2008 bei größeren Renovierungen und Neuanschlüssen auf Grundlage des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EnWG) und der Messzugangsverordnung (MessZV) gesetzlich vorgeschrieben.<sup>122</sup> Smart Metering ist ein wirkungsvolles Instrument der Netzbetreiber die Netzauslastung auf der Nachfrageseite zu regulieren. Das Beeinflussen der Nachfrage als Regulierungsmaßnahme wird Demand Side Management genannt.<sup>123</sup>

<sup>119</sup> (Albersmann, et al., 2012), Seite 16

<sup>120</sup> Vgl. (Verein für Konsumenteninformation, 2011)

<sup>121</sup> (Bundesministerium der Justiz, 2012), § 21c (5)

<sup>122</sup> Vgl. (ASUE, 2011), Seite 1

<sup>123</sup> Vgl. (Entelios AG, ohne Jahr)

Integriert in ein Smart Home lassen sich zudem intelligente Elektrogeräte in das Konzept des Smart Metering integrieren, indem sie automatisch starten, wenn der Smart Meter einen günstigen Stromtarif meldet.<sup>124</sup> Das Smart Home geht jedoch deutlich über den Aspekt der Energieeinsparung hinaus. Weitere zentrale Gegenstände sind die Vernetzung von Unterhaltungs- und Kommunikationstechnologien, Sicherheit, die Automatisierung von Abläufen und eine intelligente Haushaltssteuerung von Heizung, Beleuchtung, Steckdosen usw.; alles mit dem Ziel die Lebensqualität des Nutzers zu steigern.<sup>125</sup>

Weitere Bestandteile des Smart Grids sind Speicher (siehe 3.2.3) und Energiemanagementsysteme, welche eine effizientes Netzmanagement unterstützen.

### **3.2 Komponenten des virtuellen Kraftwerks**

Auf dem derzeitigen Energiemarkt ist es für Erzeuger erneuerbarer Energien aufgrund der geringen Produktionsleistung der Anlagen häufig unwirtschaftlich sich am Stromhandel zu beteiligen. Erst der Zusammenschluss vieler Kleinanlagen, welche über eine zentrale technische Steuerung miteinander verbunden sind, ermöglicht den Erzeugern ein wirtschaftliches Auftreten am Energiemarkt. Diese Organisationsform der dezentralen Einzelanlagen wird im Allgemeinen als virtuelles Kraftwerk verstanden.<sup>126</sup>

Neben dem Begriff Virtuelles Kraftwerk sind die Begriffe Kombikraftwerk, Schwarmkraftwerk und Cluster aus Dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA-Cluster) zur Beschreibung dezentraler Kleinanlagen zur Energieerzeugung gebräuchlich. Sie unterliegen derzeit ebenfalls keiner festen Definition und werden, sofern sie von der Definition eines virtuellen Kraftwerks abweichen, in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

In der Literatur sind hinsichtlich des virtuellen Kraftwerks mehrere Definitionsansätze zu finden, welche sich im Laufe der letzten Jahre konkretisiert haben. Eine einheitliche Definition existiert jedoch nicht.

---

<sup>124</sup> Vgl. (Verein für Konsumenteninformation, 2011)

<sup>125</sup> Vgl. (Sedlmaier, 2011)

<sup>126</sup> Vgl. (Energietechnische Gesellschaft im VDE, 2007), Seite 14

Die ersten Definitionsansätze aus dem Jahr 2006 basieren auf damaligen Forschungs- und Entwicklungsprojekten und haben einen konzeptionellen Charakter. Es werden dezentralen Erzeugungsanlagen beschrieben, die über ein Netzwerk verbunden sind und von dort aus zentral gesteuert werden:

*„Das Konzept des virtuellen Kraftwerks sieht vor, dezentrale Erzeugungsanlagen informationstechnisch untereinander zu vernetzen und extern zu regeln, um weitere, über die verbrauchsnahe Versorgung hinausgehende energiewirtschaftliche Aufgaben übernehmen zu können.“*<sup>127</sup>

AUER et al. definieren im Rahmen ihres Forschungsprojektes aus der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft ein virtuelles Kraftwerk als *„ein interaktives, zentral steuerbares Netzwerk von dezentralen Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energieträger, welches in seiner Zusammensetzung der Anteile verschiedener Technologien auf die zu deckende Last abgestimmt ist.“*<sup>128</sup>

Im Jahr 2008 wurden diese Definitionsansätze von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, sowie in einer Studie der VDE um die Einbindung von Kleinerzeugern bzw. Verbrauchern und Speichertechnologien ergänzt, welche zusammen mit den dezentralen Erzeugungsanlagen ein Gesamtsystem bilden:

*„Ein Virtuelles Kraftwerk verbindet leittechnisch verteilte Erzeuger, Verbraucher und Speicher (Strom und Wärme) und optimiert deren Einsatz im Sinne des Deckungsbeitrages des Gesamtsystems.“*<sup>129</sup>

*„Das Konzept eines ‚Virtuellen Kraftwerks‘ [...] ist die Zusammenschaltung kleiner, dezentraler Stromlieferanten zu einem Verbund mit gemeinsamer Steuerung.“*<sup>130</sup>

Ein Jahr später wurde die Energieerzeugung eines virtuellen Kraftwerks von DROSTE-FRANKE et al. erstmals in einem Definitionsansatz als Substitut der herkömmlich erzeugten Kraftwerksleistung beschrieben:

---

<sup>127</sup> (Arndt, von Roon, & Wagner, 2006), Seite 52f.

<sup>128</sup> (Auer, Haas, Faber, Weißensteiner, & Obersteiner, 2006), Seite 17

<sup>129</sup> (Bühner, 2008), Seite 29

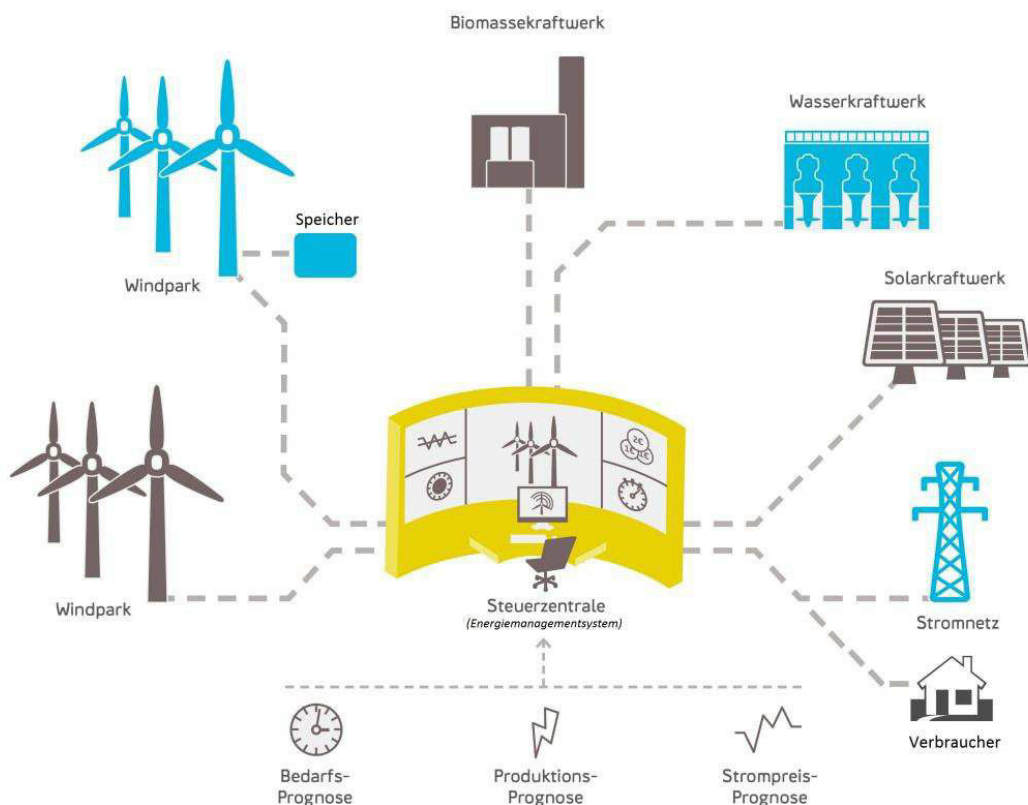
<sup>130</sup> (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2008), Seite 37

„Ein Virtuelles Kraftwerk ist ein Netzwerk, bestehend aus einer Anzahl von kleineren dezentralen Stromerzeugungsanlagen, die miteinander verbunden sind und in der Lage sind, zentrale disponible Kraftwerksleistungen zu ersetzen.“<sup>131</sup>

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie erneuerte seinen Definitionsansatz im Jahr 2013 und definiert ein virtuelles Kraftwerk nun wie folgt:

Ein virtuelles Kraftwerk vernetzt „viele kleine dezentrale Anlagen und Speicher [...] und (lässt sie) wie ein großes Kraftwerk wirken“.<sup>132</sup>

Wie die angeführten Definitionen erkennen lassen, kann ein virtuelles Kraftwerk aus verschiedenen Kombinationen von Energieerzeugern, Verbrauchern und Speichern zusammengesetzt sein, welche am Energiemarkt als gemeinsame Einheit auftreten (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: Beispiel eines virtuellen Kraftwerks**<sup>133</sup>

<sup>131</sup> (Droste-Franke, 2009), Seite 81

<sup>132</sup> (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013c), Seite 7

<sup>133</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Statkraft Germany GmbH, ohne Jahr)

Virtuelle Kraftwerke können, ebenso wie ein konventionelles Kraftwerk, größere Mengen Energie zur Verfügung stellen. Die zentrale Steuerung des VK übernimmt dabei die Koordinierungs- und Steuerungsfunktion.<sup>134</sup>

In den angeführten Definitionen lassen sich kleine dezentrale Energieerzeugungsanlagen, integrierte Verbraucher, Energiespeichertechnologien, sowie einer zentralen technischen Steuerung als die vier wesentlichen Komponenten eines virtuellen Kraftwerks identifizieren. Die Zusammensetzung der Komponenten weist in den verschiedenen virtuellen Kraftwerken einen hohen Individualitätsgrad auf.

### **3.2.1 Dezentrale Energieerzeugungsanlagen**

Die Energieversorgung in den vergangenen Jahrzehnten wurde überwiegend mittels zentral angesiedelter fossiler und atomarer Großkraftwerke realisiert. Der zentral erzeugte Strom muss über weite Strecken zum Verbraucher transportiert werden. Dementgegen steht die dezentrale Energieversorgung, welche durch den Einsatz vieler Kleinanlagen in Verbrauchernähe realisiert wird. Die Kleinanlagen befinden sich dort, wo die Energie benötigt wird. Die dezentrale Energieversorgung zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität und zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten der Erzeugungsanlagen aus.<sup>135</sup> Eine besondere Bedeutung kommt dabei den erneuerbaren Energien (siehe Abbildung 19) zu, da ihr Anteil an der Energieversorgung in Deutschland im Rahmen der Energiewende, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, in den nächsten Jahrzehnten deutlich zunimmt.

---

<sup>134</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 81

<sup>135</sup> Vgl. (Agentur für Klimaschutz Kreis Tübingen gemeinnützige GmbH, ohne Jahr)



Primärenergiequelle	Erscheinungsform	Natürliche Energieumwandlung	Technische Energieumwandlung
SONNE	Biomasse	Photosynthese	Verbrennung / Brennstoffzelle
	Wasserkraft	Wasserkreislauf	Wasser- / Osmosekraftwerk
	Windenergie	Atmosphärenbewegung	Windenergieanlage
		Wellenbewegung	Wellenkraftwerk
	Solarstrahlung	Meeresströmung	Meeresströmungskraftwerk
		Erwärmung der Erdoberfläche, der Meere und der Atmosphäre	Wärmepumpe
			Meereswärmekraftwerk
		Direkte, diffuse, reflektierte Solarstrahlung	Photolyse
			Photovoltaik
			Solarthermisches Kraftwerk
ERDE-MOND	Gravitation Erde-Mond	Gezeiten	Gezeitenkraftwerk
ERDE	Erdwärme und Isotopenzerfall	Geothermie	Geothermisches Kraftwerk

**Abbildung 19: Umwandlungsmöglichkeiten erneuerbarer Energiequellen<sup>136</sup>**

Erneuerbare Energiequellen haben ihren Ursprung überwiegend in solarer Energie, welche in Form von Biomasse, Wasserkraft, Windenergie und Solarstrahlung zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt wird. Neben der Sonnenenergie kann diese auch aus der Nutzung von Erdwärme oder den Gezeitenkräften gewonnen werden.

Zu den dezentralen Anlagen zählen jedoch nicht nur Anlagen, welche mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Auch Kleinkraftwerke oder Blockheizkraftwerke, welche sowohl mit erneuerbaren, als auch mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, fallen unter diesen Begriff. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedene Energieerzeugungsquellen und -technologien näher vorgestellt.

### 3.2.1.1 Biomasse

Unter Biomasse wird die Masse an organischem Material verstanden. Hierzu zählen lebende und abgestorbene Organismen und organische Stoffwechselprodukte. Die zur Energieerzeugung genutzte Biorohmasse kann verschiedener Herkunft sein. So werden neben dem Anbau von speziellen Energiepflanzen

<sup>136</sup> (Kaltschmitt, Streicher, & Wiese, 2013), Seite 55

auch Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft verwertet. Die gewonnene Biorohmasse wird aufbereitet und in Form von gut nutzbaren Biomassebrennstoffen, wie Brennholz, Pellets, Ölen, Alkoholen und Gasen, entweder direkt vom Endverbraucher oder von Heizwerken zur Strom- oder Wärmeerzeugung verwendet.<sup>137</sup>

### **Biomassekraftwerk**

Biomassekraftwerke ähneln vom Funktionsprinzip den Kohlekraftwerken, allerdings stammen die verwendeten Brennstoffe aus regenerativen Energiequellen. Statt Kohle werden Hackschnitzel, Holzreste in einem Dampfkessel verbrannt. Der aus der Biomasse entweichende Wasserdampf treibt eine Turbine an, welche an einen Generator angeschlossen ist. Während ein Kohlekraftwerk eine Leistung von über 1000 MW erreichen kann, liegt die von Biomassekraftwerken bei etwa 10 bis 20 MW. Die geringere Leistungserbringung liegt in der Versorgungsstruktur mit Biomassebrennstoffen begründet. Die Kraftwerke könnten mehr Leistung erbringen, allerdings müssten die Brennstoffe überregional beschafft werden. Um diese Entwicklung zu verhindern vergütet das EEG nur Biomassekraftwerke die eine Leistung von 20 MW nicht überschreiten.

Das Biomassekraftwerk Königs Wusterhausen bei Berlin deckt mit einer Leistung von 20 MW den Strombedarf von knapp 50.000 Haushalten. Der Brennstoff stammt aus Alt- und Restholzbeständen aus der Region Berlin. Das Kraftwerk erreicht einen Wirkungsgrad von ca. 35 %.

Biomassekraftwerke, welche neben elektrischem Strom auch Wärme erzeugen, werden Biomasseheizwerke genannt. In der Regel erreichen Anlagen, die mit Kraft-Wärme-Kopplung (siehe 3.2.1.7) arbeiten, höhere Wirkungsgrade als Biomassekraftwerke, da sie die im Verbrennungsprozess entstehende Wärme nutzen.<sup>138</sup>

---

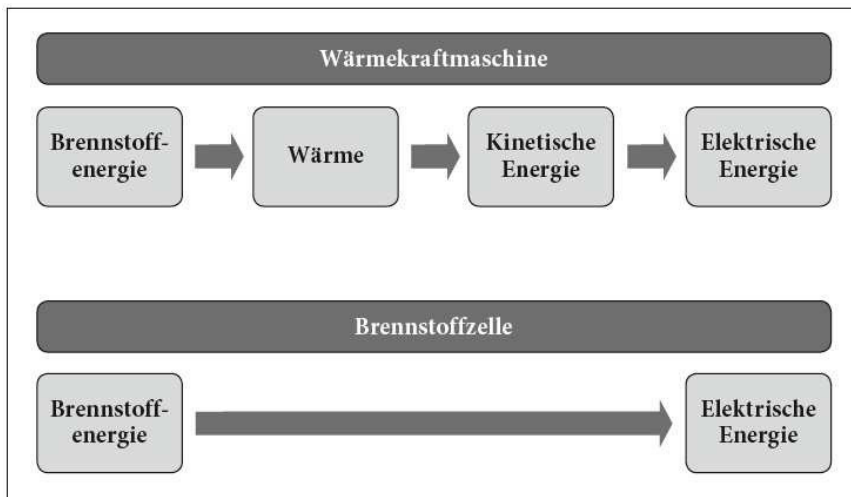
<sup>137</sup> Vgl. (Quaschning, 2013) Seite 292 ff.

<sup>138</sup> (Quaschning, 2013), Seite 304-306

## Brennstoffzelle

In einer Brennstoffzelle wird chemische Reaktionsenergie in elektrische Energie umgewandelt, indem der Brennstoff, z.B. Wasserstoff, und Sauerstoff miteinander reagieren. Je nach Brennstoffzellentyp werden auch andere Brennstoffe, wie Erdgas und Methanol, als Energieträger eingesetzt. Die Brennstoffzelle erzeugt nur so lange Strom wie Brennstoffe zugeführt werden.

Ein Vergleich der Energieumwandlungskette von Brennstoffzellen und konventionellen Kraftwärmemaschinen zeigt, dass die Zwischenumwandlungen der Brennstoffenergie in Wärme und kinetische Energie in der Brennstoffzelle nicht stattfinden, weshalb sie einen höheren Wirkungsgrad erreichen.<sup>139</sup>



**Abbildung 20: Vergleich der Energieumwandlungsketten<sup>140</sup>**

Neben dem hohen Wirkungsgrad haben Brennstoffzellen den Vorteil, dass sie keine schädlichen Emissionen erzeugen, wartungsarm sind und ein sehr gutes Regelverhalten aufweisen. Zudem sind sie durch die verschiedenen Brennstoffzellentypen vielseitig einsetzbar. Die Anwendungsbereiche der Brennstoffzelle reichen von der Hausenergieversorgung in Form von Blockheizkraftwerken bis hin zum Kraftwerksbetrieb. Entscheidend für die Auswahl des Brennstoffzellentyps sind unter anderem das benötigte Temperaturniveau, die Anzahl der Start- und Stoppvorgänge, die Anschaffungs- und Betriebskosten, sowie die Lebensdauer.

<sup>139</sup> Vgl. (Droste-Franke, 2009), Seite 45

<sup>140</sup> (Droste-Franke, 2009), Seite 45

Brennstoffzellen sind sowohl für den stationären Betrieb geeignet, wie auch für den mobilen und portablen. Stationäre Brennstoffzellen werden vorwiegend im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung zur dezentralen Energieversorgung verwendet. Mobile Anlagen kommen in der Regel im Verkehrssektor zum Einsatz, während portable Systeme meist zur Stromerzeugung in elektronischen Klein-geräten eingesetzt werden.<sup>141</sup>

### **3.2.1.2 Wasserkraft**

Auf der Erde existieren etwa 1,4 Milliarden km<sup>3</sup> Wasser, welche sich durch die Einwirkung solarer Strahlungsenergie in einem ständigen Kreislauf aus Verdunstung und Niederschlag befinden. Für die Energieerzeugung aus Wasserkraft sind vor allem die Abflussmenge und die Fallhöhe des Wassers von Bedeutung, da fast alle Wasserkraftwerke natürliche Höhenunterscheide zur Energieerzeugung nutzen.<sup>142</sup>

#### **Laufwasserkraftwerk**

Das Funktionsprinzip des Laufwasserkraftwerks basiert auf der Überwindung von Höhenunterschieden im Flussbett. Durch die Errichtung eines Wehrs wird auf der höher gelegenen Ebene des Flussbetts ein Rückstau erzeugt. An der Staustufe befinden sich Turbinen, welche das Wasser passieren muss, bevor es dem Flussverlauf weiter folgen kann. Die Turbinen sind an einen Generator angeschlossen, welcher aus der Energie des Wassers elektrischen Strom erzeugt. Da die Höhenunterschiede im Flussbett häufig nur wenige Meter betragen, gibt es nur wenige Laufwasserkraftwerke die eine Leistung von mehr als 100 MW erbringen.

### **3.2.1.3 Windkraft**

Die Sonne erwärmt die Erdoberfläche im Gebiet um den Äquator stärker als in anderen Gebieten, da sie dort im Zenit steht. Die unterschiedliche Erwärmung führt zu einer Bildung von Luftdruckunterschieden zwischen den höher und tiefer gelegenen Luftschichten. Die räumlichen Druckunterschiede führen zu einer

---

<sup>141</sup> Vgl. (Reich & Reppich, 2013), Seite 242 f.

<sup>142</sup> Vgl. (Quaschnig, 2013), Seite 244, 249

Ausgleichsströmung in Form von Winden, indem von Norden und Süden Luft in Richtung des Äquators strömt.<sup>143</sup> Der entstandene Wind lässt sich global zur Stromerzeugung nutzen.

## Windkraftanlagen

Moderne Windkraftanlagen werden, ebenso wie Flugzeuge, durch die Erzeugung von Auftrieb angetrieben. Dies ist durch die besondere Bauform der Rotorblätter möglich, welche im Querschnitt dem Rotorblatt eines Helikopters ähneln. Die Oberseite der Rotorblätter weist eine größere Wölbung als die Unterseite auf, weshalb der Luftstrom auf der Oberseite einen längeren Weg zurücklegen muss und sich infolgedessen Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Gemäß des Gesetzes der Energieerhaltung sinkt durch die Geschwindigkeitserhöhung der Luftdruck auf der Flügeloberseite. Durch diese Druckunterschiede entsteht eine Auftriebskraft, welche die Rotorblätter in Bewegung versetzt und ein Drehmoment erzeugt. Die radiale Bewegungsenergie wird über ein zwei- bis dreistufiges Getriebe an einen Generator übertragen, welcher sie in elektrische Energie umwandelt. Durch die Veränderung des Anstellwinkels der Rotorblätter lässt sich die Drehzahl den Windverhältnissen anpassen.

Windkraftanlagen, die eine Höhe von 50 m überschreiten, sind gemäß des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) genehmigungspflichtig. Für Kleinwindkraftanlagen muss lediglich eine baurechtliche Genehmigung eingeholt werden.<sup>144</sup>

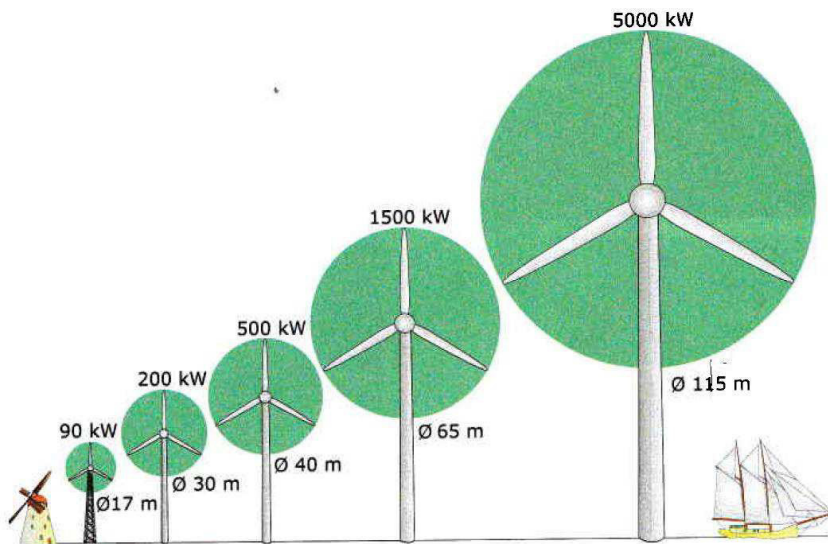
Mit zunehmender Größe der Anlage, nimmt ihre Leistungsfähigkeit deutlich zu. Während eine Kleinanlage mit einem Rotorblattdurchmesser 40 m etwa 500 kW Leistung erbringen kann, erreicht eine Großanlage von 115 m Durchmesser die zehnfache Leistung (siehe Abbildung 21). Moderne Windkrafträder laufen bereits bei Windgeschwindigkeiten von neun bis 13 km/h an und erreichen bei 47 km/h ihre volle Leistung.<sup>145</sup>

---

<sup>143</sup> Vgl. (Kaltschmitt, Streicher, & Wiese, 2013), Seite 74, 78

<sup>144</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 94 ff.

<sup>145</sup> Vgl. (Quaschnig, 2013), Seite 225 f.



**Abbildung 21: Größen der Windkraftanlagen<sup>146</sup>**

Aus Gründen des Materialbedarfs und der Logistik der Bauteilbeschaffung ist es derzeit unwahrscheinlich, dass die Leistungserbringung von großen Windkraftanlagen 10 MW übersteigen wird.<sup>147</sup>

Heutzutage werden große Windkraftanlagen in der Regel im Rahmen eines Windparks errichtet, welcher aus mindestens drei Anlagen besteht. Je größer ein Windpark ist, desto geringer ist der Windparkwirkungsgrad, da sich die Anlagen gegenseitig verschatten. Dies kann zu Verlusten zwischen drei bis 15 % führen. Weiterhin müssen bestimmte Auflagen und Abstandsregulierungen zu Wohngebieten bei der Errichtung von Windkraftanlagen eingehalten werden, welche die Standortauswahl begrenzen. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Erschließung der Meere zum Windparkbau eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Diese sogenannten Offshore-Parks profitieren zudem von den stärkeren und gleichmäßigeren Windverhältnissen auf offener See. Der Ertrag kann bis zu 50 % über dem einer Onshore-Anlage liegen.<sup>148</sup>

### 3.2.1.4 Solarstrahlung

Solare Strahlung ist das Ergebnis einer gewaltigen Kernfusion im Inneren der Sonne. Etwa zwei Millionstel der energiereichen Sonnenstrahlung treffen auf

<sup>146</sup> (Quaschning, 2013), Seite 223

<sup>147</sup> Vgl. (Quaschning, 2013), Seite 223

<sup>148</sup> Vgl. (Quaschning, 2013), Seite 228 f.

der Erde auf. Mit einer Energiemenge von  $10^{18}$  KWh jährlich reicht diese Menge an Sonnenenergie aus, um den weltweiten Jahresenergiebedarf um das Zehntausendfache zu decken. In Deutschland treffen jedes Jahr 900-1200 kWh Strahlungsenergie pro  $\text{km}^2$  auf die Erdoberfläche.<sup>149</sup> Diese Zahlen unterstreichen die Bedeutung der Sonne als Primärenergiequelle für die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung.

## **Wärmepumpe**

Wärmepumpen erzeugen mittels der Nutzung von Niedrigtemperaturquellen Wärme, welche zum Heizen und zur Wassererwärmung verwendet werden kann. Als Wärmequellen können das Grundwasser, die Umgebungsluft, das Erdreich oder die Abwärme aus Industrieunternehmen dienen. Die Niedertemperaturwärme wird in einem Kältemittel innerhalb eines geschlossenen Kreislaufs gespeichert und von der Wärmepumpe mittels elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Je höher die Temperatur der Wärmequelle, desto weniger Energie muss zugeführt werden, um das gewünschte Temperaturniveau zu erreichen. Wärmepumpen gehören daher sowohl zu den Erzeugungsanlagen, da sie erneuerbare Wärmequellen nutzen, als auch zu den Verbrauchern, da zur Erhöhung des Temperaturniveaus elektrische Energie eingesetzt wird. Wärmepumpen lassen sich anhand der verwendeten Wärmequelle und des abgegebenen Wärmemediums in „Luft/Luft-, Luft/Wasser-, Sole/Wasser- oder Wasser/Wasser-Systeme“<sup>150</sup> unterscheiden.<sup>151</sup>

## **Photovoltaik**

Unter Photovoltaik wird die direkte Umwandlung von solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen verstanden. Vereinfacht dargestellt funktioniert dieser Umwandlungsprozess wie folgt: Solare Strahlungsenergie dringt in die Oberfläche der Solarzelle ein und regt die freibeweglichen Ladungsträger innerhalb des Zellmaterials an. Die Ladungsträger werden durch ein inneres elektrisches Feld getrennt; wobei die negativ geladenen Elektronen zur Zellvorderseite und die positiv geladenen Ladungsträger zur Zellrückseite

---

<sup>149</sup> Vgl. (Bergmann & Scheibe-Keßler, ohne Jahr)

<sup>150</sup> (Quaschning, 2013), Seite 277 ff.

<sup>151</sup> Vgl. (Quaschning, 2013), Seite 278

beschleunigt werden. An der Solarzelle befinden sich auf der Ober- und Unterseite Kontakte, welche die Ladungsträger sammeln. Werden beide Kontaktstellen leitend miteinander verbunden, fließt ein elektrischer Strom.

Sonnenenergie weist jedoch eine verhältnismäßig geringe Energiedichte auf und ist zudem nicht jederzeit verfügbar. Besonders in den Wintermonaten nimmt der Energieertrag deutlich ab. Während er an einem Sommertag bei durchschnittlich 5 kWh/m<sup>2</sup> liegt, werden im Winter täglich etwa 0,5 kWh/m<sup>2</sup> erzielt. Der Wirkungsgrad einer seriell gefertigten Solarzelle liegt je nach Zelltyp zwischen 9 % und 18 %.<sup>152</sup>

### **Solarthermisches Kraftwerk**

Der Einsatz einer solarthermischen Anlage zur Stromerzeugung, wird als solarthermisches Kraftwerk bezeichnet. Im internationalen Umfeld wird der Begriff Concentrated Solar Power (CSP) verwendet.

Solarthermische Anlagen wandeln solare Strahlungsenergie in thermische Energie um. Die einfallende Solarstrahlung trifft zunächst auf die Absorberschicht des Solarkollektors und erwärmt diese. Die aufgenommene thermische Energie wird über Kupfer- und Aluminiumrohre an ein Wärmeträgerfluid (Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel) weitergegeben, welches als Energie-Transportmedium fungiert.

Die solarthermische Anlage ist an ein konventionelles Kraftwerk gekoppelt, welches die aufgenommene thermische Energie mittels Turbinen, Kondensatoren und Generatoren in elektrische Energie umwandelt.

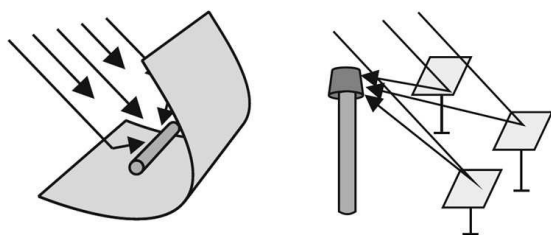
Bei der Nutzung solarthermischer Anlagen im Kraftwerksprozess wird die Solarstrahlung, bevor sie auf die Solarkollektoren trifft, zunächst über Spiegelsysteme und Linsen aufkonzentriert um höhere Temperaturen zu erzielen. Am häufigsten werden Parabolrinnenkollektoren und Turmkraftwerke mit Heliostatenfeldern (siehe Abbildung 22) als Strahlungskonzentratoren eingesetzt. Sie sind in der Lage die Strahlungskonzentration um das 100 bis 1000-fache zu verstärken.<sup>153</sup>

---

<sup>152</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 69 ff.

<sup>153</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 83 ff.





**Abbildung 22: Parabolrinnenkollektor (links) und Turmkraftwerk mit Heliostatfeldern (rechts)<sup>154</sup>**

Auf der spanischen Hochebene von Guadix sind derzeit die drei Parabolrinnen-Solkraftwerke Andasol 1, 2 und 3 in Betrieb. Jede Anlage verfügt über eine Nennleistung von 50 MW. Infolge der guten Strahlungsbedingungen können die Anlagen rund 3500 Stunden jährlich Volllast ausgelastet werden.<sup>155</sup>

### 3.2.1.5 Gravitationskraft

Die Gravitation, als eine der vier Grundkräfte der Physik, bewirkt die gegenseitige Anziehung von Erde, Mond und Sonne. Da sich die Erde in einer ständigen Drehbewegung befindet, ändern sich die Gezeitenkräfte regelmäßig. Dies führt zu einer periodischen Veränderung des Meeresspiegels, da die Wassermassen den Anziehungskräften folgen (Ebbe und Flut).

#### Gezeitenkraftwerk

Gebiete mit einer besonders großen Veränderung des Wasserstandes eignen sich für den Einsatz von Gezeitenkraftwerken. Durch die Errichtung eines Dammes wird eine Bucht abgeteilt, in welche das Wasser bei Flut über Turbinen einströmen und bei Ebbe ausströmen kann. Mittels eines Generators wird die Energie in Strom transformiert.<sup>156</sup>

### 3.2.1.6 Geothermie

Geothermie ist die Nutzung von Erdwärme, welche sich im oberen Teil der Erdkruste befindet. Die thermische Energie kann entweder direkt zur Beheizung

<sup>154</sup> (Schabbach & Wesselak, 2012)

<sup>155</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 84

<sup>156</sup> Vgl. (Quaschnig, 2013), Seite 254

von Gebäuden und als Prozesswärme verwendet werden oder mittels eines Kraftwerks in elektrische Energie umgewandelt werden.

Die Erdwärme kann aus Heißwasserquellen (hydrothermal) oder aus trockenen Gesteinsschichten (petrothermal) stammen. Je tiefer sich ein Vorkommen in der Erde befindet, desto wärmer ist es. Diesbezüglich lässt sich die Geothermie hinsichtlich der Tiefe der Wärmequelle unterscheiden. Die oberflächennahe Geothermie reicht bis zu einer Grenze von 400 m und beinhaltet selten Quellen, welche wärmer als 25 °C sind. Geothermische Quellen, welche der Stromerzeugung dienen, liegen häufig mehrere tausend Meter unter der Erde und weisen Temperaturen von über 120 °C auf. Auf Grund der Tiefe ist es schwierig ergiebige Quellen zu lokalisieren.

### **Geothermisches Kraftwerk**

Verglichen mit fossilen Kraftwerken, weisen geothermische Kraftwerke sehr geringe Dampftemperaturen auf. Um bessere thermodynamische Eigenschaften zu erzielen, werden niedrigsiedende organische Lösungsmittel im Kraftwerksprozess eingesetzt, dem sogenannten Organic Rankine Cycle (ORC). Um den ORC-Prozess einzuleiten muss zunächst das Gemisch aus Wasser und Dampf gefördert und anschließend voneinander getrennt werden. Der flüssige Teil des Wassers wird genutzt um das ORC-Arbeitsmedium (häufig Pentan oder Butan) vorzuwärmen, während der Wasserdampf es so weit erhitzt, dass es in den gasförmigen Zustand übergeht. Das ORC-Arbeitsmedium wird nun – anstelle des Wasserdampfs – in der Kraftwerksturbine entspannt und zur Erzeugung des elektrischen Stroms herangezogen.<sup>157</sup>

#### **3.2.1.7 Kraft-Wärme-Kopplung**

„Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage.“<sup>158</sup> Der Vorteil dieser Kopplung ist, dass kaum Verlustenergie in Form von Wärme anfällt, da der Großteil nutzbar ist. Die eingesetzte Energie kann sowohl fossiler, als auch er-

---

<sup>157</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 91 ff.

<sup>158</sup> (Schaumann & Schmitz, 2010), Seite 6

neuerbarer Herkunft sein. Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung hat bereits Einzug in Industriegebäude und Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser gefunden. In Form von Kleinkraftwerken in modularer Blockbauweise, den sogenannten Blockheizkraftwerken versorgen sie den Verbraucher direkt vor Ort mit Wärme und Energie.<sup>159</sup>

## **Blockheizkraftwerke**

Blockheizkraftwerke (BHKW) zeichnen sich durch die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Kraft aus, daher werden sie auch Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung genannt. Die erzeugte Kraft (mechanische Energie) wird im Regelfall direkt in elektrische Energie transformiert.<sup>160</sup> Als Brennstoffe eignen sich sowohl fossile, als auch erneuerbare Öle und Gase, sowie Holzhackschnitzel oder Pellets. Dementsprechend kann das BHKW von einem Verbrennungs-, Dampf- oder Gasmotor, einer Gasturbine oder einem Stirlingmotor angetrieben werden.<sup>161</sup>

BHKW lassen sich bezüglich ihrer Betriebskonzepte in wärmegeführte, stromgeführte und netzgeführte BHKW unterscheiden. Wärmegeführte BHKW haben ihren Schwerpunkt in der Bereitstellung von Wärme, während der Strom als Nebenprodukt anfällt. Die Energiebereitstellung richtet sich nach dem lokalen Wärmebedarf und wird durch das ab- oder zuschalten von Aggregaten geregelt. Da der Fokus auf der Bereitstellung von Wärme liegt, wird dementsprechend wenig Strom erzeugt, welcher im Regelfall zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet wird. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und vergütet.

Bei stromgeführten BHKW erfolgt hingegen die Auskopplung von Wärme, welche bei der Stromerzeugung entsteht. Die Wärme kann in einem Wärmespeicher für die spätere Nutzung gespeichert werden. Stromgeführte BHKW werden häufig auf Maximallast mit erneuerbaren Rohstoffen betrieben, um von den höheren Einspeisevergütungen nach dem EEG zu profitieren.

Während sich die Erzeugungsmenge bei wärme- und stromgeführten BHKW nach dem lokalen Bedarf richtet, unterliegen netzgeführte Anlagen den Vorga-

---

<sup>159</sup> Vgl. (Quaschning, 2013), Seite 304-306

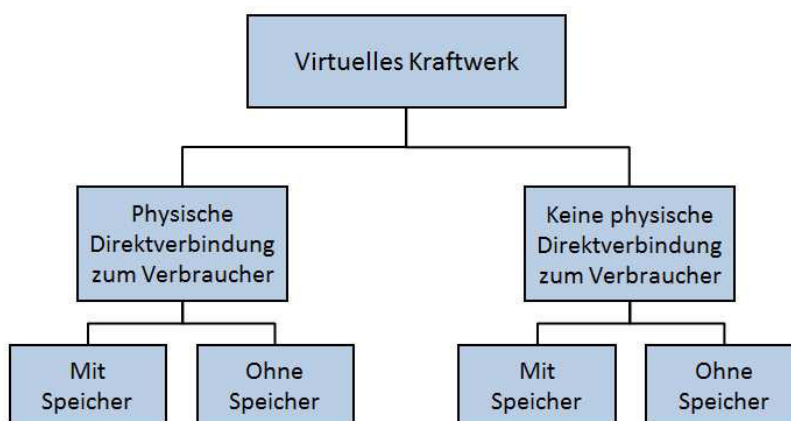
<sup>160</sup> Vgl. (Schaumann & Schmitz, 2010), Seite 7

<sup>161</sup> Vgl. (Kuschinski, ohne Jahr a)

ben einer zentralen Stelle. Der Einsatz der Anlagen wird – entsprechend der Idee des VK – nach „wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geplant und umgesetzt“<sup>162</sup>. Die Besonderheit der BHKW ist ihre Flexibilität, da sie nicht an Wetterbedingungen geknüpft sind. Damit sind sie in der Lage die Volatilität anderer erneuerbarer Energien gezielt abzufangen.<sup>163</sup>

### 3.2.2 Verbraucher

Die Ausgestaltung virtueller Kraftwerke ist von einer hohen Individualität geprägt und erlaubt eine große Kombinationsvielfalt der Erzeugungs- und Speichertechnologien, sowie der zentralen technischen Steuerung und der Verbrauchereinbindung. Eine grobe Einteilung lässt sich anhand der folgenden Modell-landschaft vornehmen (siehe Abbildung 23).



**Abbildung 23: Verbindung zum Verbraucher**<sup>164</sup>

Während der Verbraucher in der zentralen Stromversorgung nur die Rolle des Endkunden einnahm, ist er im Konzept des virtuellen Kraftwerks ein Teil des Systems. Verbraucher können in zweierlei Weise in das VK eingebunden sein. Im ersten Fall besteht eine physische Direktverbindung zum Verbraucher. Die Erzeugungsanlagen sind über Leitungen direkt mit dem Verbraucher verbunden. Im zweiten Fall besteht keine physische Direktverbindung zwischen Verbraucher und VK. Die Verbindung findet in Form eines geschlossenen Bilanz-

<sup>162</sup> (Kuschinski, ohne Jahr b)

<sup>163</sup> Vgl. (Kuschinski,, ohne Jahr b)

<sup>164</sup> (Projekt "Virtual Power Plants", 2013)

kreises statt (siehe Abschnitt 2.3.3.2), welcher durch Einspeisung und Verbrauch im Gleichgewicht gehalten wird.

In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, dass der Verbraucher über einen Energiespeicher verfügt. Dieser kann als Regulierungsinstrument in das virtuelle Kraftwerk eingebunden werden und überschüssige Energie zwischenspeichern.

Neben den physikalischen Regulierungsmaßnahmen besteht die Möglichkeit verbrauchseitige Energiemanagementmaßnahmen zu ergreifen. Im Rahmen des Demand Side Managements (DSM) wird versucht, die Nachfrage dem Energieangebot anzupassen. Demand Side Management lässt sich auf folgende Weisen umsetzen:

- Lastverlagerung
- Änderung des Energiebedarfs
- Substitution eines Energieträgers

Bei der Lastverlagerung wird davon ausgegangen, dass die bezogene Energiemenge über einen längeren Zeitraum in der Summe konstant ist, es jedoch Hoch- und Niedriglastzeiten gibt. Dem Verbraucher werden durch Preissignale Anreize gesetzt seinen Energieverbrauch in Niedriglastbereiche zu verlagern, da der Strom zu diesen Zeiten besonders günstig ist. Zudem lassen sich die schwankenden Erzeugungsmengen erneuerbarer Energien durch einen temporär erhöhten Verbrauch kompensieren. Private Haushalte können dies erreichen, indem sie beispielsweise ihre Wasch-, Spül- und Trockengeräte zu den entsprechenden Zeiten starten.

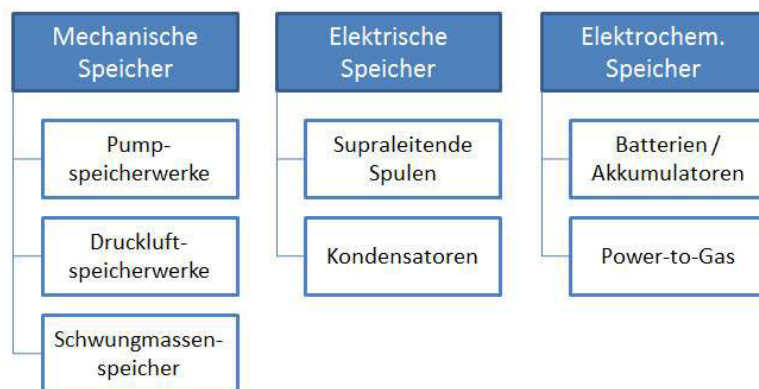
Ein zweiter Ausgangspunkt des DSM besteht in der Änderung des Energiebedarfs. Dieser Ansatz geht davon aus, dass sich die Energienachfrage in einem bestimmten Zeitbereich entweder dauerhaft ändert oder temporär variieren lässt. Eine dauerhafte Senkung kann beispielsweise durch monetäre Anreize in Form von Energiesparaktionen erreicht werden, während eine Erhöhung durch gezielte Förderung von Stromverbrauchern möglich ist.

Die dritte Variante des DSM besteht in der Substitution eines Energieträgers. Dieses Konzept kommt insbesondere in den Bereichen Heizung und Warmwasseraufbereitung zur Anwendung. Das Grundprinzip besteht darin, auf Er-

zeugungsänderungen flexibel zu reagieren, indem temporär knappe Energieträger durch andere substituiert werden. Unvorhersehbare Schwankungen und Prognosefehler, vor allem im Bereich der erneuerbaren Energieerzeugung, lassen sich ausgleichen, indem verbraucherseitige Wärme- oder Stromerzeugungsanlagen zu- oder abgeschaltet werden. Einer Unterversorgung durch erneuerbare Energien kann beispielsweise durch Hinzuschalten einer Ölheizung ausgeglichen werden. Solche bivalenten Systeme ermöglichen, insbesondere in der Kombination mit Speichersystemen, einen optimierten Einsatz der fossilen und regenerativen Energieträger.<sup>165</sup>

### 3.2.3 Energiespeichertechnologien

Mit der Zunahme regenerativer Energieträger in der Stromversorgung gewinnt der Einsatz von Speichertechnologien an Bedeutung. Die Aufgabe der Energiespeicher besteht in der Zwischenspeicherung temporär überschüssiger Elektrizität in Form von mechanischer, elektrischer oder elektrochemischer Energie (siehe Abbildung 24).<sup>166</sup>



**Abbildung 24: Energiespeichertechnologien**<sup>167</sup>

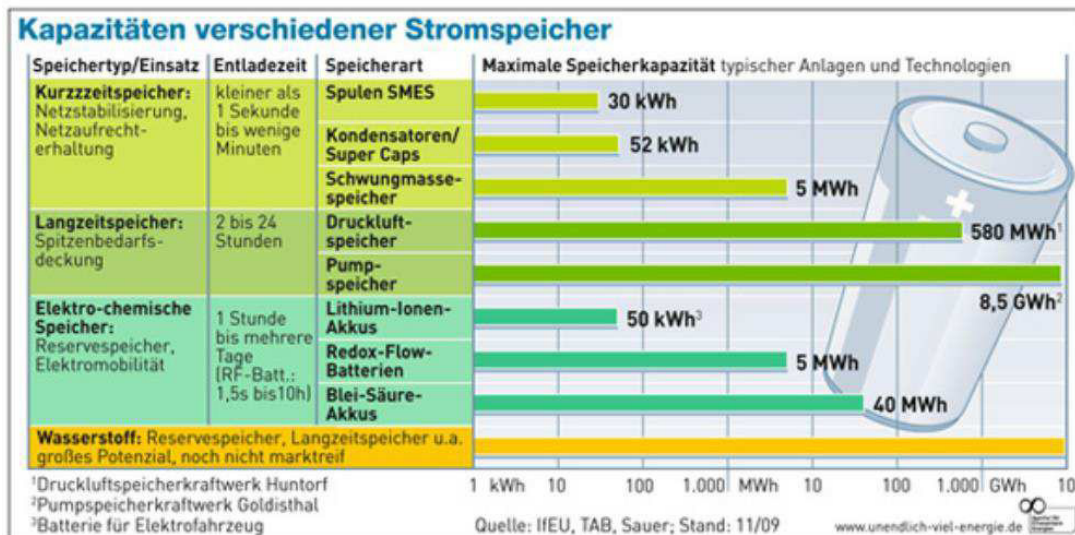
Die Rückumwandlung der gespeicherten Energie ist jedoch nicht ohne Verluste möglich. Die Wirkungsgrade variieren je nach Speichertechnologie enorm.<sup>168</sup> Die verschiedenen Stromspeicher weisen Entladezeiten von unter einer Sekunde, bis hin zu mehreren Tagen auf (siehe Abbildung 25).

<sup>165</sup> Vgl. (Brauner, Poppl, & Tiefgraber, 2006), Seite 51-53

<sup>166</sup> Vgl. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, ohne Jahr)

<sup>167</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Deutsche Energie-Agentur GmbH, ohne Jahr)

<sup>168</sup> Vgl. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, ohne Jahr)



**Abbildung 25: Kapazitäten verschiedener Stromspeicher<sup>169</sup>**

Zu den Kurzzeitspeichern zählen Spulen, Kondensatoren und Schwungmassespeicher. Ihre Entladezeit beträgt maximal mehrere Minuten, weshalb sie zur kurzfristigen Netzstabilisierung eingesetzt werden. Die größte Speicherkapazität der Kurzzeitspeicher haben Schwungmassespeicher mit 5 MWh.

Unter allen Speichern weisen Langzeitspeicher mit Abstand die höchsten Speicherkapazitäten auf. Druckluftspeicher können bis zu 580 MWh speichern; Pumpspeicher sogar bis zu 8,5 GWh. Sie können zwei bis 24 Stunden Energie liefern und sind besonders zur Deckung von Spitzenlasten geeignet.

Die längsten Entladezeiten haben elektrochemische Speicher, welche bis zu mehreren Tagen Energie liefern können. Sie kommen in Form von Batterien und Akkumulatoren zum Einsatz.

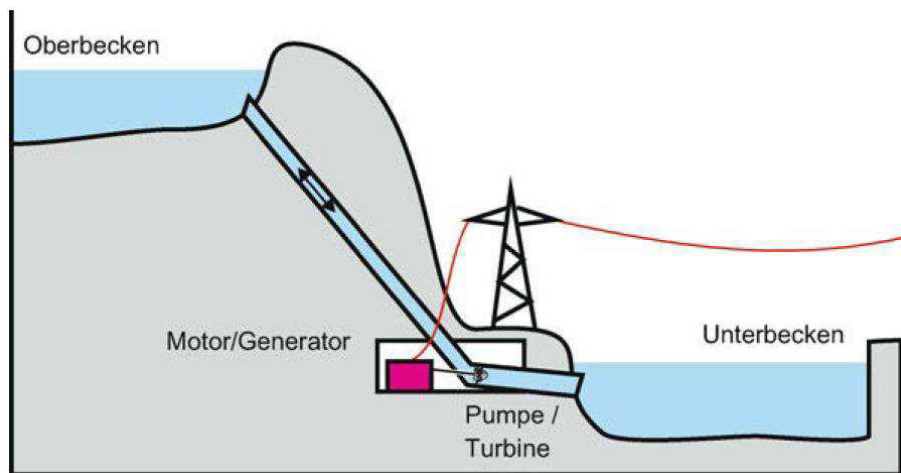
### 3.2.3.1 Mechanische Speicher

Mechanische Speicher lassen sich in die drei Varianten Pumpspeicherwerk, Druckluftspeicher und Schwungmassenspeicher unterteilen, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

<sup>169</sup> (DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH, ohne Jahr)

## Pumpspeicherwerke

Der Grundgedanke der Stromspeicherung mittels eines Pumpspeicherwerks ist es, überschüssigen Strom in mechanische potentielle Energie umzuwandeln und diese im Bedarfsfall freizusetzen. Um dies zu erreichen, wird der überschüssige Strom zum Betrieb einer Pumpe verwendet, welche Wasser von einem tiefergelegenen Becken in ein höher gelegenes Oberbecken fördert. (siehe Abbildung 26). Während dieses Prozesses wird die elektrische Energie in potentielle Energie (Höhenenergie) transformiert.



**Abbildung 26: Aufbau eines Pumpspeicherwerks<sup>170</sup>**

Zu Spitzenlastzeiten kann die Energie der Wassermasse innerhalb von Minuten abgerufen werden, indem das Wasser aus dem Oberbecken genutzt wird, um eine tiefergelegene Turbine anzutreiben. Ein Generator überführt die Höhenenergie wieder in elektrische Energie. Der Wirkungsgrad moderner Pumpspeicherwerke beträgt über 80 %. Die Kraftwerke sind in der Lage eine Leistung von mehreren 100 MW über einen Zeitraum von vier bis acht Stunden zu erbringen. Das größte deutsche Pumpspeicherwerk in Thüringen erreicht bereits eine Leistung von 1060 MW.<sup>171</sup> In Deutschland gibt es etwa 30 solcher Stromspeicher. Sie decken etwa 95 % der Speicherkapazitäten ab.<sup>172</sup>

Pumpspeicherwerke eignen sich jedoch nur bedingt die überschüssigen Energiemengen, die durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien entste-

<sup>170</sup> (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 107

<sup>171</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 107

<sup>172</sup> Vgl. (Osterkorn & Petzold, 2012), Seite 104



hen, zu speichern, da der Baugrund für solche Anlagen in Deutschland sehr begrenzt ist. Da das System der Pumpspeicherung jedoch sehr effektiv ist, gibt es bereits Ansätze dieses Verfahren auf andere Gebiete zu transferieren. Ein Ansatzpunkt ist die Nutzung der Hohlraum-Masten von Windkraftträdern als Wasserspeicher. Diese könnten, mittels überschüssigen Stroms aus der Win- derzeugung, mit Wasser gefüllt werden. In windschwachen Phasen kann das Wasser abgelassen und in Strom umgewandelt werden, was die Volatilität der Anlagen reduzieren würde.<sup>173</sup>

### **Druckluftspeicherwerke**

In einem Druckluftspeicherwerk, auch als CAES-Kraftwerk bekannt, wird der temporär überschüssige Strom verwendet um Frischluft mittels eines Elektro- motors zu verdichten und in eine geologisch geeignete Drucklufthöhle zu pres- sen (siehe Abbildung 27).<sup>174</sup>

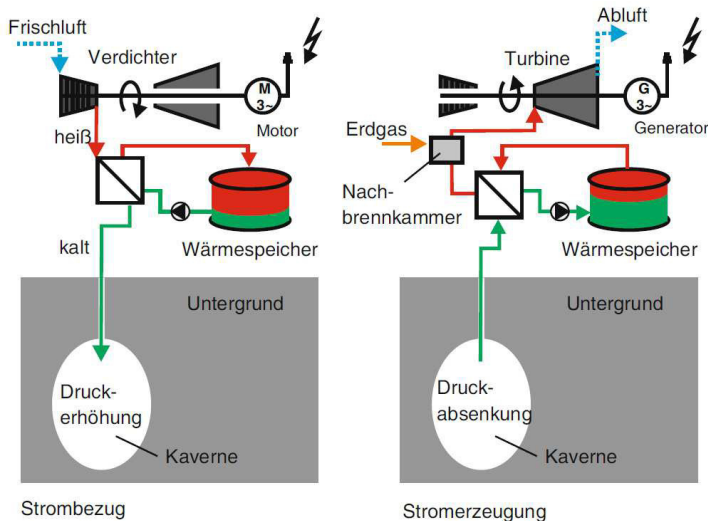
Bei der Kompression der Luft entsteht thermische Energie (Wärme), welche der Luft vor der Einlagerung in die Drucklufthöhle entzogen und in einem Wärme- speicher zwischengelagert wird.

Sobald Strom erzeugt werden soll, wird die Druckluft mittels der Wärme aus dem Wärmespeicher und einer erdgasbetriebenen Nachbrennkammer erhitzt und über Turbinen freigegeben. So können über einen Zeitraum von bis zu drei Stunden 321 MW abgegeben werden. Ein Generator wandelt die Energie schließlich in Elektrizität um.

---

<sup>173</sup> Vgl. (Eiselt, 2012), Seite 67 f.

<sup>174</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 108



**Abbildung 27: Aufbau eines Druckluftspeicherwerks<sup>175</sup>**

Bislang sind zwei Anlagen dieses Typs in Betrieb. Eine Anlage steht in den USA und arbeitet mit einem Wärmespeicher, während die zweite Anlage in Deutschland ohne Wärmespeicher betrieben wird. Der Wirkungsgrad des Pumpspeicherkraftwerks ohne Wärmespeicher beträgt derzeit etwa 26 %. Planer gehen davon aus, dass durch den Einsatz eines Wärmespeichers und dem Wegfall der zusätzlichen Erwärmung mit Erdgas sogar ein Wirkungsgrad von über 70 % möglich ist.<sup>176</sup>

### Schwungmassenspeicher

Schwungmassenspeicher (Schwungradspeicher) werden durch die Zuführung von Energie in Rotation versetzt. Gemäß des Gesetzes der Erhaltung des Drehimpulses wird die Rotation aufrechterhalten und die zugeführte Energie gespeichert. Eine Verlangsamung der Rotation führt zu einer Energieabgabe. Die Energie kann mittels eines Generators in elektrische Energie umgewandelt werden. Da Schwungmassenspeicher eine Selbstentladung von 20 bis 50 % innerhalb von zwei Stunden aufweisen, eignen sie sich insbesondere zur kurzzeitigen Speicherung von Energie.<sup>177</sup>

<sup>175</sup> (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 108

<sup>176</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 108

<sup>177</sup> Vgl. (Wien Energie Vertrieb GmbH & Co KG, 2012)

### **3.2.3.2 Elektrische Speicher**

Elektrische Energie lässt sich in zweierlei Weise direkt speichern: In Kondensatoren und in supraleitenden Spulen. Beide Konzepte werden nachfolgend vorgestellt.

#### **Supraleitende Magnetische Energiespeicher**

Supraleiter verlieren ihren elektrischen Widerstand, sobald sie ihre materialspezifische Sprungtemperatur unterschreiten. Diese Eigenschaft wird sich in den sogenannten SMES-Systemen zunutze gemacht. Es handelt sich dabei um Supraleitende Magnetische Energiespeicher mit einer maximalen Speicherkapazität von 30 kWh. Der wesentliche Bestandteil eines solchen Systems ist eine auf -269°C gekühlte, supraleitende Spule, welche sich in einem durch Gleichstrom erzeugten Magnetfeld befindet. Da die Spule in diesem Zustand ihren elektrischen Widerstand verloren hat, kann die zugeführte Energie lange gespeichert werden. Durch Entladung der Spule wird die Energie wieder freigegeben. Bei der Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom gehen etwa 3 bis 5 % der Energie durch Wärmezeugung verloren. Die Umwandlung ist jedoch notwendig, da das Stromnetz mit Wechselstrom funktioniert.<sup>178</sup>

#### **Kondensatoren**

Kondensatoren zählen zu den Kurzzeitspeichern. SuperCaps (Superkondensatoren) haben die höchste elektrische Kapazität aller Kondensatoren und werden u.a. zur Speicherung erneuerbarer Energien verwendet. Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien ist die Speicherkapazität von Kondensatoren jedoch gering. Demgegenüber sind sie in der Lage elektrische Energie direkt zu speichern, ohne sie in eine andere Energieform umzuwandeln. Zudem haben sie eine fast unbegrenzte Lebensdauer, eine geringe Ladezeit und können bei Temperaturen zwischen -25 bis 70 °C eingesetzt werden. Da sie aus Aluminium, Kohlenstoff und einem organischen Elektrolyt bestehen, ist ihre Entsorgung umweltfreundlich.<sup>179</sup>

---

<sup>178</sup> Vgl. (Heidjann GmbH & Co. KG, ohne Jahr a)

<sup>179</sup> Vgl. (Kattermann & Kucera, 2011)

### 3.2.3.3 Elektrochemische Speicher

Elektrochemische Speicher wandelt die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie um. Klassische Speicherformen sind Batterien und Akkumulatoren.

#### Batterien und Akkumulatoren

Batterien und Akkumulatoren kommen als Reservespeicher oder in der Elektromobilität zum Einsatz, da sie Energie bis zu mehreren Tagen speichern können. Unter ihnen zählen die Redox-Flow-Batterie und die Natrium-Schwefel-Batterie zu den Energiespeichern der Zukunft.

In Redox-Flow-Batterien zirkulieren zwei energiespeichernde flüssige Elektrolyte in verschiedenen Kreisläufen, welche durch eine Membran voneinander getrennt sind. Die Membran dient zum Ionenaustausch zwischen den Elektrolyten. Als Redoxpaare kommen häufig Zink-Brom, Polysulfid-Bromid und Vanadium-Vanadium zum Einsatz. Redox-Flow-Batterien haben mit 75 bis 80 % eine hohe Effizienz und lassen sich häufig wiederverwenden. Einsatzbereiche sind vor allem die Elektromobilität, aber auch die Absicherung von Versorgungseinheiten bei Stromausfällen.<sup>180</sup>

Entgegen der Redox-Flow-Batterie erfordert die Verwendung einer Natrium-Schwefel-Batterie besonders anspruchsvolle Betriebsbedingungen. Zum einen erreicht sie hohe Betriebstemperaturen bis zu 350 °C und zum anderen muss die Batterie vor Beschädigungen geschützt werden, um das Austreten der aggressiven chemischen Elemente Natrium und Schwefel zu vermeiden. Als Folge des schwierigen Umgangs blieb die in den 70er Jahren entwickelte Natrium-Schwefel-Batterie ein Nischenprodukt.

Derzeit werden Natrium-Schwefel-Batterien überwiegend in Japan weiterentwickelt und produziert. Sie kommen dort in einigen Großprojekten als Energiespeicher für Solar- und Windstrom zum Einsatz, indem mehrere stationäre Batterien zusammengeschaltet werden. Dies ermöglicht eine Leistungserbringung von mehreren Megawatt. Natrium-Schwefel-Batterien verwenden, im Gegensatz zu anderen Batterie-Bauarten, kein flüssiges Elektrolyt und feste Elektro-

---

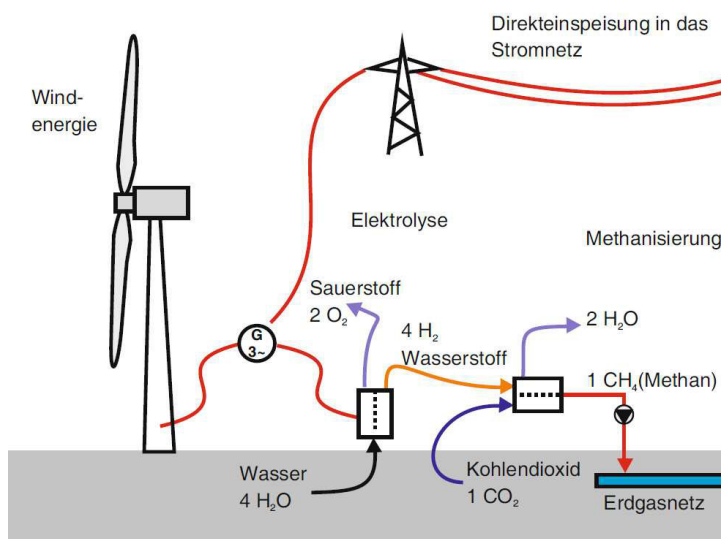
<sup>180</sup> Vgl. (Heidjann GmbH & Co.KG, ohne Jahr b)

den. Als Anode wird geschmolzenes Natrium verwendet, während flüssiger Schwefel als Kathode dient. Als Elektrolyt kommt natriumhaltiges Aluminiumoxid zum Einsatz. Diese Batterieform ist sowohl für langsame Entladungen, als auch hohe Leistungen in einem kurzen Zeitraum geeignet.

Den schwierigen Betriebsbedingungen stehen geringe Herstellungspreise, sowie ein geringes Baugewicht entgegen. Dies steigert die Attraktivität von Natrium-Schwefel-Batterien für den zukünftigen Einsatz in der Elektromobilität und der dezentralen Energieversorgung.<sup>181</sup>

## Power to Gas

Power to Gas bezeichnet einen chemischen Prozess, bei dem regenerativ erzeugte elektrische Energie in Erdgas umgewandelt wird. Zunächst wird der überschüssige Strom eingesetzt um mittels Elektrolyse Wasserstoff zu gewinnen (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28: Methanisierung**<sup>182</sup>

Wasserstoff eignet sich prinzipiell ebenso zur Energiespeicherung, weist jedoch nur ein Drittel des Energiegehalts von Methan auf. Zudem ist Methan ein Hauptbestandteil von Erdgas, weshalb die vorhandene Infrastruktur zur Verteilung genutzt werden kann.

<sup>181</sup> Vgl. (Heidjann GmbH & Co.KG, ohne Jahr c)

<sup>182</sup> (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 109

Im zweiten Schritt des Umwandlungsprozesses findet die Methanisierung statt. Unter Zugabe von Kohlenstoffdioxid entsteht synthetisches Methan, welches ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Der Wirkungsgrad der Methanisierung beläuft sich auf ca. 60 %. Bei der Verstromung des Methans, z.B. in einem modernen Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD-Kraftwerk), kommt es zu weiteren Energieverlusten, so dass höchstens 34 % des eingesetzten Stroms wiedergewonnen werden.<sup>183</sup>

### **3.2.4 Zentrale technische Steuerung**

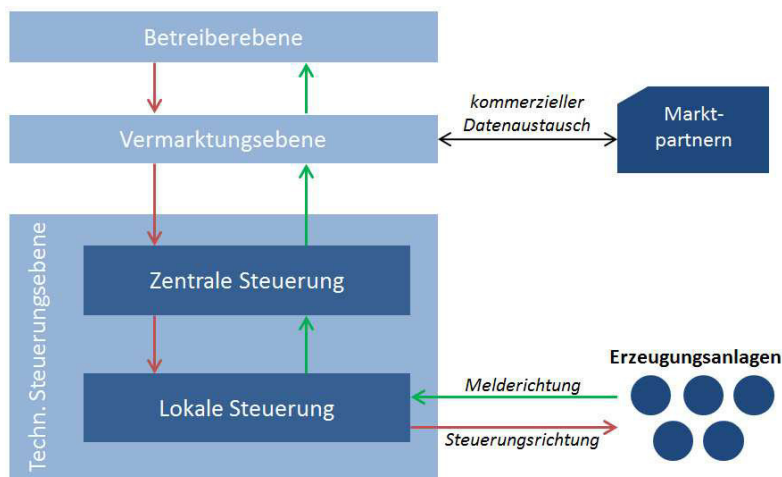
Der Betrieb eines VK stellt durch die komplexen Informationsstrukturen und flexiblen Rahmenbedingungen hohe Anforderungen an die Informationstechnologie. Eine zentrale technische Steuerung soll dem Anlagenbetreiber ermöglichen, das Potential des VK optimal zu erschließen indem es Bedarfe prognostiziert, die Energieerzeugung und -speicherung optimiert und die Einsatzfahrpläne der Anlagen steuert. Diese Prozesse erfordern eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem Anlagenbetreiber und den Erzeugungsanlagen. Der Anlagenbetreiber muss imstande sein Steuerungssignale an die dezentral platzierten Erzeugungsanlagen zu senden und Meldungen von diesen zu empfangen, welche ihm aufbereitet zur Verfügung gestellt werden. Die Informationsflüsse in einem VK lassen sich auf drei Ebenen darstellen: der Betreiberebene, der Vermarktungsebene und der technischen Steuerungsebene (siehe Abbildung 29).

Auf der Betreiberebene werden bestimmte Eckdaten vorgegeben, welche den Betrieb des VK betreffen, wie Beteiligungsverhältnisse, Vertragsparameter und Zielvorgaben. Diese müssen in der Steuerungszentrale hinterlegt werden um sie in das Betriebskonzept des VK integrieren zu können.<sup>184</sup>

---

<sup>183</sup> Vgl. (Schabbach & Wesselak, 2012), Seite 109 ff.

<sup>184</sup> Vgl. (Albersmann, et al., 2012), Seite 38 - 40



**Abbildung 29: Informationsflüsse in einem virtuellen Kraftwerk<sup>185</sup>**

Auf der nachfolgenden Vermarktungsebene findet die operative Steuerung der Vermarktung statt, sowie das Management des Energie- und Risikoportfolios. Im Rahmen der Vermarktung erfolgt ein kommerzieller Datenaustausch mit betroffenen Marktpartnern, z.B. Industrieunternehmen, die eine Direktabnahme der Energie beabsichtigen. Laut Britta Hilt, Mitbegründerin und Geschäftsführerin der IS Predict GmbH, haben die Planung und Prognose an dieser Stelle eine erfolgskritische Bedeutung. „Es muss zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein, dass (a) genügend Energie (b) effizient erzeugt und verteilt wird, sodass sie den Energieverbrauchern (c) rechtzeitig und (d) zuverlässig (e) zu vernünftigen Konditionen zur Verfügung gestellt wird. Hierzu bedarf es hochgenauer und frühzeitiger Prognosen für hoch-dynamische Erzeuger- und Verbraucherlastgänge.“<sup>186</sup> Es wird deutlich, dass der Betrieb eines VK mit einem sehr hohen Planungsaufwand und Prognoserisiken verbunden ist, da die Planungsgrundlage einer ebenso hohen Dynamik unterliegt. Ohne IT-Unterstützung ist es nicht möglich diese Datenmengen sinnvoll zu verwenden.

Die auf der Vermarktungsebene generierten kommerziellen Daten werden anschließend auf der technischen Steuerungsebene weiterverarbeitet. Diese besteht aus der zentralen Steuerung und der lokalen Steuerung.

Die zentrale Steuerung konvertiert die kommerziellen Vorgaben in maschinengerechte konkrete Einsatz- und Steuerkommandos, welche sowohl einzelne

<sup>185</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Albersmann, et al., 2012), Seite 38 - 40

<sup>186</sup> (Hilt, 2011), zitiert nach (Albersmann, et al., 2012), Seite 39

Anlagen, als auch Anlagengruppen betreffen können und gibt diese an die lokale Steuerung weiter.

Die lokale Steuerung spricht die Steuerungs- und Regelungseinrichtungen der Erzeugungsanlagen an und setzt die erhaltenen Kommandos vor Ort um. Im Gegenzug erhält sie „technische Zustandsmeldungen, Mess- und Zählwerte sowie Störungs- und Schutzmeldungen“<sup>187</sup> von jeder Erzeugungsanlage. Die Daten werden von der zentralen Steuerung ausgewertet, um aktuelle Informationen bezüglich der Netzinfrastruktur ergänzt, und logisch verknüpft.

Diese Datengrundlage wird auf der Vermarktungsebene weiter verdichtet und dient als Grundlage für Planungs- und Steuerungszwecke, z.B. der Generierung von Verfügbarkeits- und Erzeugungsprofilen einzelner Anlagen oder Anlagengruppen. Ergänzt um vergangenheitsbezogene Daten ist eine umfangreiche Einsatzplanung möglich. Der Betreiber des virtuellen Kraftwerks ist durch die Steuerungszentrale in der Lage die Wirtschaftlichkeit des Anlageneinsatzes zu verfolgen und zu koordinieren.<sup>188</sup>

Die Integration dieser verschiedenartigen Komponenten, Systeme und Anlagen ist eine große Herausforderung für die IT. Jeder Anlagenbetreiber hat eigene Software und Hardware, welche in die Steuerungszentrale eingebunden werden müssen. Hinzu kommt die Vereinigung der kommerziellen und der informationstechnischen Sicht in einem IT-System.

Aus kommerzieller Sicht müssen betriebswirtschaftliche Daten zur Verfügung stehen, welche mittels ERP-Systemen verarbeitet werden können. Um diese Daten zu erfassen, bedarf es einer Vielzahl weiterer Systeme, welche Energie- und Portfoliodaten, sowie Betriebsmittelinformationen erfassen. Hinzu kommen technische Strukturen, um die Anlagen aus der Ferne zu steuern.

Auf Grund der fünfzehnminütigen Zeitintervalle, in welchen Prognosen im Rahmen des Bilanzkreismanagements erstellt werden müssen, ergeben sich zudem riesige Datenmengen, die Verarbeitet werden müssen.<sup>189</sup>

Zusammenfassend ergeben sich vier Herausforderungen, welche die zentrale technische Steuerung lösen muss:

---

<sup>187</sup> (Albersmann, et al., 2012), Seite 40

<sup>188</sup> (Albersmann, et al., 2012), Seite 38 - 40

<sup>189</sup> Vgl. (Albersmann, et al., 2012), Seite 40 - 41



- „hohe Integrationsfähigkeit
- Unterstützung von Standards
- hohe Performance und Reaktionsgeschwindigkeit bis hin zur Echtzeitverarbeitung
- hohes Verarbeitungspotential für wachsende Datenmengen“<sup>190</sup>

### 3.3 Betriebskonzepte virtueller Kraftwerke

Virtuelle Kraftwerke haben gegenüber konventionellen Kraftwerken die Besonderheit, dass der Stromerzeugungsprozess durch die volatilen Energiequellen von einer hohen Flexibilität geprägt ist. Um die Anlagen effizient betreiben zu können, werden sie durch eine Steuerungszentrale koordiniert. Dieser Umstand ermöglicht VK verschiedenste Betriebskonzepte zu realisieren.

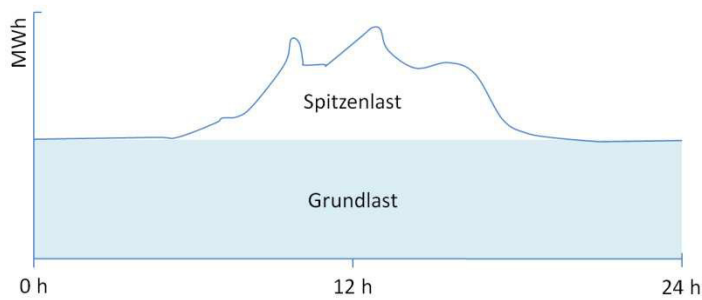
Eines der möglichen Betriebskonzepte liegt in dem rasanten Wandel des Energiemarktes begründet, welcher durch den Fukushima-Effekt (siehe 2.2) beschleunigt wurde. Die bisher entstandenen und in Zukunft noch zunehmenden Versorgungslücken, welche unter anderem durch den Wegfall der Atomkraftwerke entstehen, sollen mit erneuerbaren Energien in Form dezentraler Erzeugungsanlagen gefüllt werden. Das VK kann eingesetzt werden, um die konventionellen Großkraftwerke zu substituieren. Damit diese die Planbarkeit und Leistungsfähigkeit eines Großkraftwerks erreichen, müssen sie im Verbund betrieben und koordiniert werden. Im Rahmen eines VK können diese Herausforderungen gemeistert werden. Es handelt sich zudem um eine Lösung, welche zeitnah umsetzbar ist und erneuerbare Energien künftig ohne EEG-Förderungen marktfähig macht.<sup>191</sup>

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des VK besteht im Spitzenlastausgleich – auch Peak Shaving genannt. Für das Betriebskonzept des Peak Shaving eignen sich insbesondere Anlagen, welche zu Spitzenlastzeiten den meisten Strom erzeugen (siehe Abbildung 30).

---

<sup>190</sup> (Albersmann, et al., 2012), Seite 41

<sup>191</sup> Vgl. (Albersmann, et al., 2012), Seite 24



**Abbildung 30: Tageslastgang<sup>192</sup>**

Prinzipiell können jedoch alle Anlagen eines VK so gesteuert werden, dass sie vorzugsweise zu den Spitzenlastzeiten Strom in das öffentliche Netz speisen. Für den Betreiber des VK ergeben sich durch diese gezielte Einspeisesteuerung höhere Erlöse, da der Strompreis zu Spitzenlastzeiten steigt. Gegenüber den Spitzenlastkraftwerken haben VK den Vorteil, dass sie durch die geringeren Stromgestehungskosten in der Einsatzreihenfolge (Merit-Order) der Kraftwerke weit vorne liegen und die teureren konventionellen Kraftwerke verdrängen. Dies führt zu einer Senkung des Spitzenlastpreises.

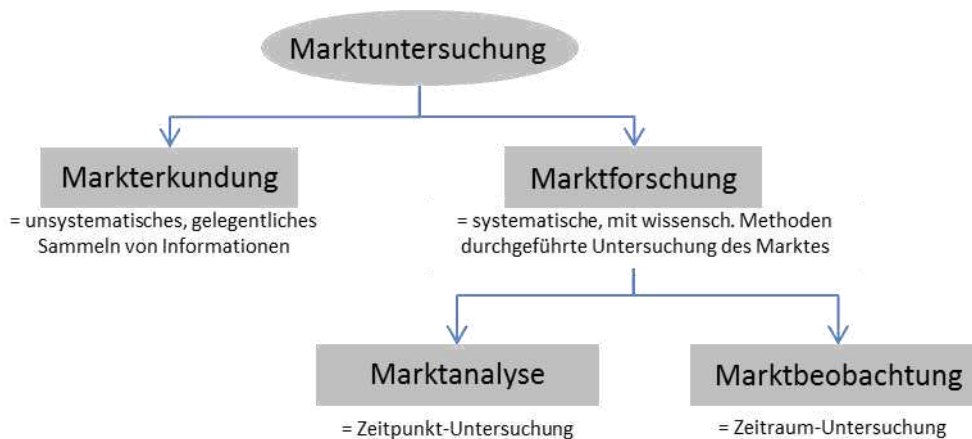
Trotz aller Regulierungsmaßnahmen ist in Zukunft von einem erhöhten Regelleistungsbedarf auszugehen. Virtuelle Kraftwerke können, trotz der Volatilität der erneuerbaren Energien, für diesen Einsatzzweck herangezogen werden. Ein VK, welches als Regelleistungskraftwerk betrieben wird ist in der Lage flexible Mengen Strom in das Netz einzuspeisen. Der Betrieb eines Regelleistungskraftwerks ist jedoch an bestimmte Voraussetzungen geknüpft. Zunächst muss das Kraftwerk bestimmte Präqualifikationsbedingungen hinsichtlich der Bereitstellung von Primär-, Sekundär- und Minutenreserve erfüllen. Im Falle der Minutenreserve muss beispielsweise eine Mindestleistung von ca. 15 MW erreicht werden. Um schnell auf Lastabweichungen und Frequenzschwankungen reagieren zu können, müssen Regelleistungskraftwerke eine hohe Aktivierungsgeschwindigkeit haben. Virtuelle Kraftwerke sind in der Lage diese Aspekte zu erfüllen. Darüber hinaus können sie sowohl positive, als auch negative Regelernergie bereitstellen.<sup>193</sup>

<sup>192</sup> (Albersmann, et al., 2012), Seite 21

<sup>193</sup> Vgl. (Albersmann, et al., 2012), Seite 20-26

## 4 Untersuchung des Marktes für virtuelle Kraftwerke

Die vorliegende Marktuntersuchung lässt sich in den Bereich der Marktanalyse einordnen, da eine systematische Untersuchung des Marktes durchgeführt wurde (siehe Abbildung 31) und die Befragung einmalig stattfand.<sup>194</sup>



**Abbildung 31: Arten der Marktuntersuchung**<sup>195</sup>

Es handelt sich um eine qualitative Untersuchung, da sich die Daten auf eine kleine Anzahl ausgewählter Teilnehmer beziehen. Es lassen sich keine Rückschlüsse auf die Gesamtheit des Marktes für virtuelle Kraftwerke ziehen, weshalb auf eine mathematisch-statistische Auswertung der Daten verzichtet wurde. Die qualitative Marktforschung war für diese Untersuchung besonders geeignet, da neue Erkenntnisse in einem neuen, unbekannten Marktumfeld gewonnen werden sollen.<sup>196</sup>

### 4.1 Methodisches Vorgehen

Die Methodik der Datenerhebung ist der Primärforschung zuzuordnen. Es wurde eine Online-Befragung von Experten durchgeführt und nicht auf Sekundärquellen zurückgegriffen. Um die Nachvollziehbarkeit der Erhebung zu gewährleisten, werden nachfolgend die Rahmenbedingungen der Untersuchung näher erläutert. Begonnen wird mit einer Beschreibung der Stichprobe, sowie der Vorstellung des Untersuchungsdesigns. Im Anschluss wird auf den Fragebogen, sowie die Durchführung der Befragung eingegangen.

<sup>194</sup> Vgl. (Weis & Steinmetz, 2012), Seite 25

<sup>195</sup> Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Weis & Steinmetz, 2012), Seite 25

<sup>196</sup> (Weis & Steinmetz, 2012), Seite 38 f.

#### 4.1.1 Stichprobe

Die Grundgesamtheit (Population) der vorliegenden Untersuchung bilden deutsche Kraftwerksbetreiber, welche sich bzw. ihre Geschäftstätigkeit als virtuelles Kraftwerk definieren. Es handelt sich um eine Teilerhebung, da die Größe der Grundgesamtheit nicht bekannt ist. In einer im April 2014 durchgeführten Internetrecherche wurden 34 potentielle inländische Kraftwerksbetreiber ausfindig gemacht, welche sich in der Außendarstellung auf ihrer Website als virtuelles Kraftwerk präsentierten. Die Entscheidung für dieses Auswahlverfahren liegt darin begründet, dass derzeit keine einheitliche Definition für den Begriff des „Virtuellen Kraftwerks“ vorliegt.

In einem Telefongespräch wurde eruiert, dass sechs der potentiellen Teilnehmer kein VK betreiben. Vier potentielle Kraftwerksbetreiber konnten zudem nicht erreicht werden. Sie wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen.

Der Stichprobenumfang umfasste letztendlich 24 identifizierte Betreiber virtueller Kraftwerke. Es kann keine Repräsentativität der Stichprobe vorausgesetzt werden, da nicht gewährleistet werden kann, dass alle Untersuchungsobjekte ausfindig gemacht wurden. Von den 24 Kraftwerksbetreibern nahmen neun an der Befragung teil.

Bei den neun Kraftwerksbetreibern handelte es sich um zwei große Unternehmen mit mehr als 8.000 Mitarbeitern, um ein mittleres Unternehmen mit etwa 470 Mitarbeitern, um vier Kleinunternehmen zwischen 25 und 80 Mitarbeitern, sowie um zwei Kleinstunternehmen mit fünf bzw. sechs Mitarbeitern.<sup>197</sup>

Die Betrachtung der Standorte der Leitwarten ergab ein sehr heterogenes Bild (siehe Abbildung 32). Es konnten keinerlei geografische Präferenzen bezüglich der Standortwahl ermittelt werden.

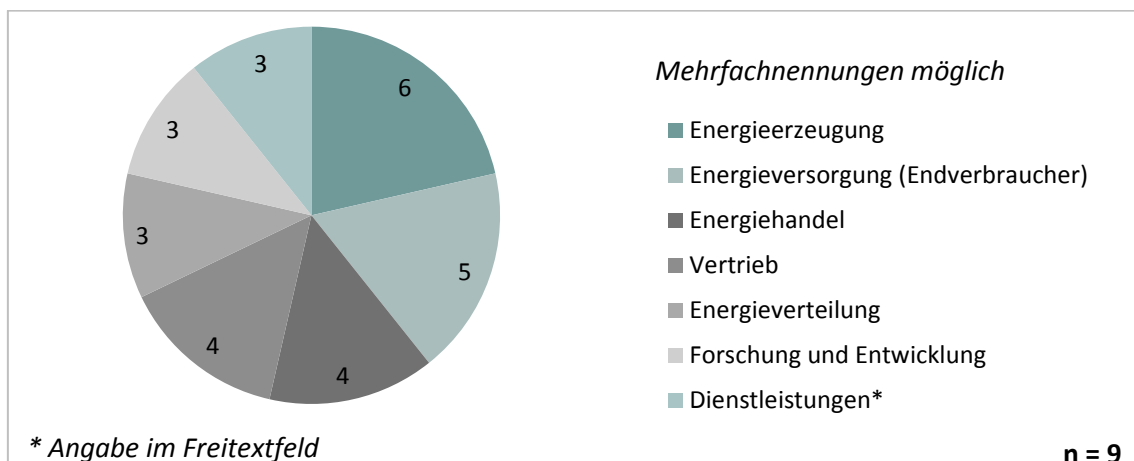
---

<sup>197</sup> Die Einordnung basiert auf einer Empfehlung der Europäischen Union zur Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen vom 6. Mai 2003 (2003/361/EG)



**Abbildung 32: Standorte der Leitwarten in Deutschland**

Demgegenüber hatten die Angaben zu der Geschäftstätigkeit der Unternehmen deutlich mehr Aussagegehalt. Bis auf zwei Teilnehmer, welche nur in der Forschung und Entwicklung tätig waren, erstreckt sich das Tätigkeitsfeld der anderen Befragten auf mehrere Bereiche. Von den neun befragten Betreibern virtueller Kraftwerke waren sechs im Bereich der Energieerzeugung tätig (siehe Abbildung 33).



**Abbildung 33: Geschäftsfelder der befragten Teilnehmer**

Fünf Befragte versorgten zudem Endverbraucher mit Strom, während vier auch im Energiehandel, sowie Vertrieb tätig waren. Drei Kraftwerksbetreiber gaben

an im Bereich der Energieverteilung zu arbeiten. Im Freitextfeld ergänzten drei Teilnehmer, dass sie zudem Dienstleistungen im Energiebereich anbieten.

#### **4.1.2 Untersuchungsdesign**

Die erste Kontaktaufnahme mit den Kraftwerksbetreibern fand telefonisch statt. Der Hintergrund des Telefonats war insbesondere die Teilnahmebereitschaft der Kraftwerksbetreiber zu erhöhen. Dazu wurden die Ziele und der Verlauf der Untersuchung, der Befragungszeitraum, sowie die Befragungsdauer kommuniziert. Die Bekanntgabe dieser Informationen ist gemäß Sieghard Beller empfehlenswert um die Teilnahmebereitschaft zu erhöhen<sup>198</sup>. Im Anschluss an das Telefonat erfolgte an alle Betreiber eines VK der elektronische Versand des Fragebogens (siehe Anhang A – Fragebogen), sowie einer Zusammenfassung mit allgemeinen Informationen zur Marktuntersuchung.

Der Befragungszeitraum umfasste acht Tage und erstreckte sich vom 16.05. bis zum 23.05.2014. Am vorletzten Tag (22.05.2014) erhielten alle Kraftwerksbetreiber, welche bisher noch keine Rückmeldung versendet hatten, einen Reminder mit der Bitte an der Befragung teilzunehmen.

#### **4.1.3 Ziele der Untersuchung**

Das Primärziel der vorliegenden Marktuntersuchung ist es, einen Überblick über die aktuelle Marktsituation im Bereich der virtuellen Kraftwerke zu gewinnen. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Einsatz erneuerbarer Energien im Rahmen der Energieerzeugung und der technischen Umsetzung des VK-Konzepts.

Das Sekundärziel der Untersuchung befasst sich mit dem Begriff und den Komponenten des virtuellen Kraftwerks. Da derzeit keine einheitliche Definition existiert, soll im Rahmen der Erhebung untersucht werden, wie Kraftwerksbetreiber sich selbst wahrnehmen. Die Eigenwahrnehmung wird anschließend mit den Definitionsansätzen aus der Theorie verglichen. Des Weiteren soll die Zusammensetzung eines VK in der Praxis betrachtet werden.

Zur Untersuchung der aktuellen Marktsituation wurden folgende Hypothesen überprüft:

---

<sup>198</sup> Vgl. (Beller, 2008), Seite 47

1. *Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase.*
2. *Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum.*
3. *Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben.*

Die Untersuchung der Komponenten des virtuellen Kraftwerks, sowie der Definitionen, wurde mittels folgender Hypothese überprüft:

4. *Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung<sup>199</sup>.*

#### **4.1.4 Hypothesen**

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Erläuterung der zuvor aufgestellten Hypothesen, sowie den einzelnen Fragestellungen, welche zur Überprüfung der Hypothese herangezogen wurden. Die Zuordnung wurde in Form einer Matchingtabelle zusammengefasst (siehe Anhang B – Matchingtabelle).

##### **H1: Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase.**

Die Einleitung der Energiewende im Jahr 2010 eröffnete einen wachsenden Markt für die dezentrale Energieerzeugung. Eines der entstandenen Konzepte mit den anstehenden Veränderungen umzugehen, sind virtuelle Kraftwerke. Diese werden seither im Rahmen von Projekten, Forschungsvorhaben und im kommerziellen Betrieb erprobt. Auf Grund der Neuheit des Konzeptes, der Komplexität der erzeugten Daten und den damit verbundenen technischen Herausforderungen, wurde die These aufgestellt, dass sich virtuelle Kraftwerke noch in der Erprobungsphase befinden. Zur Überprüfung der These wurden die Kraftwerksbetreiber zu den Rahmen- und Betriebsbedingungen und zum technischen Entwicklungsstand des Kraftwerks befragt.

Einen wichtigen Anhaltspunkt, ob sich VK noch in der Erprobungsphase befinden, sollte die Frage nach dem Entwicklungsstand der Kraftwerke liefern (Frage 4). Die Befragten konnten angeben, ob es sich um ein Forschungs- oder Pilotprojekt handelt oder ob das VK bereits kommerziell genutzt wird. Zusätzlich

---

<sup>199</sup> Die zentrale technische Steuerung bezieht sich auf die eingesetzte IT-Software

sollte die Projektlaufzeit beziffert werden. Im Anschluss wurde das Datum der Inbetriebnahmen abgefragt (Frage 5), um eine zeitliche Einordnung im Zusammenhang mit den Entwicklungsstand vornehmen zu können.

Zur Feststellung der technischen Entwicklung der Kraftwerke sollten die Betreiber angeben, worin die größten Herausforderungen (Frage 21) und der größte Zeitaufwand (Frage 20) des Kraftwerksbetriebs bestehen.

Wie in Abschnitt 3.2.4 bereits beschrieben wurde, stellt der Betrieb eines VK hohe Anforderungen an die Informationstechnologie, da komplexe Strukturen, flexible Rahmenbedingungen und große Datenmengen verwaltet werden müssen. Die IT-Systeme als Herzstück der zentralen technischen Steuerung sind die Basis eines funktionierenden Kraftwerks. Zur Überprüfung des technischen Entwicklungsstandes wurden diesbezüglich Fragen zu der eingesetzten Software gestellt.

Bei der Softwareauswahl zum Kraftwerksbetrieb wurde diesbezüglich zwischen der Entwicklung einer eigenen Softwarelösung und der Verwendung einer gekauften Software unterschieden werden, welche zudem individuell an das VK angepasst werden kann (Customizing). Je nachdem entsprechen die Funktionen mehr oder weniger den Bedürfnissen der Betreiber. Diesbezüglich wurden neben der verwendeten Software (Frage 15) auch die Funktionen abgefragt, welche die Software erfüllt (Frage 16), sowie Funktionen, welche sich die Kraftwerksbetreiber zusätzlich wünschen (Frage 17).

## **H2: Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum.**

Ausgehend von der Annahme, dass sich der Markt für erneuerbare Energien bis zum Jahr 2050 in gestaffelter Form im Wachstum befindet, wie in Abschnitt 2.3.1.2 beschrieben wurde, liegt die Vermutung nahe, dass der Markt für VK ebenfalls ein Wachstum verzeichnen wird, da die Stromerzeugung im VK unter anderem mit erneuerbaren Energien realisiert wird. Der genaue Anteil erneuerbarer Energien war nicht bekannt und wurde in Hypothese 3 näher untersucht.

Die Feststellung des Marktwachstums wurde mittels der drei Kategorien Anlagintegrationen, Konkurrenzempfinden, sowie Absatzmärkte und Marktpotenzial realisiert. Auf die Abfrage monetärer Kennzahlen wurde verzichtet, da es



sich um sensible Daten der Unternehmen handelt und im Pretest diesbezüglich keine Angaben gemacht wurden (siehe 4.1.6).

Die Wahl der Anlagenintegrationen als Messgröße basierte auf der Argumentation, dass ein Wachstum des Marktes für VK nur vollzogen werden kann, wenn die Kraftwerksbetreiber bereit sind zu investieren und ihre Kraftwerke zu vergrößern. Es wurden diesbezüglich die langfristigen Integrationspläne (Frage 23), sowie die für das Jahr 2015 (Frage 22) abgefragt. Um eine grobe geografische Einschätzung vornehmen zu können, wurden zudem die Internationalisierungspläne der Kraftwerksbetreiber abgefragt (Frage 24).

„Marktwachstum besteht zumeist in neuen, jungen Märkten, die eine große Nachfrage aufweisen.“<sup>200</sup> VK agieren in einem jungen Wachstumsmarkt, da sie als Substitute die konventionellen Kraftwerke verdrängen und durch die Regelungen des EEG bevorzugt Energie ins öffentliche Netz einspeisen dürfen.

Durch das Wachstumspotenzial steigt die Attraktivität eines Marktes, weshalb die Anzahl an Wettbewerbern häufig ebenfalls zunimmt. Darin begründet wurde als zweite Messgröße für das Marktwachstum das Konkurrenzempfinden der Kraftwerksbetreiber gewählt. Die Betreiber wurden zum einen nach dem empfundenen Konkurrenzdruck durch andere VK (Frage 26) befragt und zum anderen durch den konventioneller Kraftwerke (Frage 27).

Als weitere Indikatoren für das Marktwachstum wurden die erschlossenen Absatzmärkte und eine Einschätzung des Vermarktungspotenzials der VK herangezogen. Diesbezüglich wurden die Betreiber befragt, wo bzw. an wen sie den erzeugten Strom veräußern (Frage 25). Zudem sollten die Kraftwerksbetreiber Einschätzungen zum Vermarktungspotenzial ihres VK im Jahr 2015 (Frage 28) und des langfristigen Vermarktungspotenzials (Frage 29) abgeben.

### **H3: Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben.**

Der Einsatz erneuerbare Energien ist ein wesentlicher Bestandteil der Energiewende (siehe Abschnitt 2.2). Wie in der Einleitung bereits erwähnt, bieten VK einen vielversprechenden Lösungsansatz dieses Vorhaben umzusetzen. Dies

---

<sup>200</sup> (Wirtschaftslexikon 24, ohne Jahr)

setzt jedoch voraus, dass die Energieerzeugung im VK überwiegend mit erneuerbaren Energien realisiert wird. Da einige dezentrale Energieerzeugungsanlagen (insbesondere zur KWK<sup>201</sup>) jedoch auch mit fossilen Brennstoffen betrieben werden (siehe Abschnitt 3.2.1.7), wurde die Hypothese aufgestellt, dass VK nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben werden.

Zur Überprüfung der Hypothese wurden die integrierten Erzeugungsanlagen untersucht (Frage 10), sowie der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung im VK (Frage 12). Sofern dieser nicht 100 % betrug, wurden die Kraftwerksbetreiber gebeten den Einsatz fossiler Brennstoffe zu begründen, sowie die Erzeugungsanlagen zu benennen (Frage 13).

#### **H4: Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung.**

Am Anfang des Kapitels 3.2 wurden verschiedene Definitionen zum Begriff des VK angeführt und vier wesentliche Komponenten identifiziert. Diese werden zur Grundlage für die Hypothese genommen, dass VK aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung bestehen.

Zur Überprüfung der Hypothese sollten die Kraftwerksbetreiber eine eigene Definition angeben (Frage 6). Zudem wurden ihnen verschiedene Fragen zu den Bestandteilen der VK (insbesondere die Fragen 7, 10 und 17) gestellt, welche einen Überblick über die Zusammensetzung und das Betriebsumfeld der VK in der Praxis ermöglichen sollten.

#### **4.1.5 Fragebogenerstellung**

Der Einstieg in den Fragebogen wurde mittels eines kurzen Einführungstextes erleichtert. Dieser beinhaltete die Zielgruppe, das Ende des Befragungszeitraums, eine Rücksendeadresse sowie den Hinweis auf die Zusendung der Untersuchungsergebnisse an alle Befragungsteilnehmer.

---

<sup>201</sup> Vgl. (Leipner, ohne Jahr)

Der Entscheidung die Ergebnisse zu veröffentlichen lagen folgende Überlegungen zugrunde:

Zum Untersuchungszeitpunkt lagen nur wenige Informationsquellen zum Thema Virtuelle Kraftwerke vor. Zudem wurde im ersten Telefongespräch mit den Kraftwerksbetreibern mehrmals Interesse an einer Veröffentlichung der Daten bekundet. Die Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse sollte den Kraftwerksbetreibern einen Anreiz bieten, sich an der Befragung zu beteiligen.

Die Veröffentlichung kann jedoch den negativen Effekt mit sich bringen, dass die Teilnehmer insgesamt weniger Angaben machen, insbesondere zu sensiblen Themen, da den Wettbewerbern diese Informationen zur Verfügung gestellt werden. An dieser Stelle wurde, gemäß Hypothese 2, jedoch davon ausgegangen, dass sich der Markt im Wachstum befindet und folglich ein geringes Konkurrenzempfinden der Betreiber vorliegen könnte.

Insgesamt überwogen die Argumente für die Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse.

Nach dem kurzen Einführungstext begann der eigentliche Befragungsteil. Der Fragebogen untergliederte sich in die drei Themenblöcke

- A. Allgemeiner Teil
- B. Komponenten des virtuellen Kraftwerks
- C. Betrieb des virtuellen Kraftwerks.

In Teil A. des Fragebogens wurden allgemeine Fragen<sup>202</sup> zum Unternehmen und zum virtuellen Kraftwerk gestellt, da sich diese schnell ausfüllen lassen und dem Teilnehmer einen leichteren Einstieg in die Befragung ermöglichen. Darauf folgt die Abfrage einer Definition des VK-Begriffs, welche es den Befragten ermöglicht, sich gedanklich in das Thema der virtuellen Kraftwerke zu vertiefen.

Teil B. beschäftigte sich eingehend mit den vier Komponenten des virtuellen Kraftwerks, welche in Abschnitt 3.2 betrachtet wurden. In Teil C. wurden ergänzend Fragen zum Betrieb des virtuellen Kraftwerks gestellt. Darunter fielen Fragen zu getätigten und geplanten Investitionen, Vermarktungsstrategien und Absatzplanung, sowie zur Steuerung und dem Betrieb des Kraftwerks.

---

<sup>202</sup> Die Erläuterung der Fragen findet im Ergebnisteil statt.

Die Bildung von Themenblöcken diene der Übersichtlichkeit des Fragebogens und sollte den Befragten helfen sich auf das jeweilige Thema zu fokussieren.

Der Befragungsteil endete mit einem Dank für die Teilnahme und der Aufführung der vollständigen Kontaktdaten zwecks Rückfragen.

#### **4.1.6 Pretest**

Schriftliche Befragungen bergen potentielle Risiken bezüglich der Verständlichkeit der Fragen, welche sich im Vorfeld jedoch reduzieren lassen. Zu diesem Zweck wird vor der Erhebung eine Probebefragung (Pretest) durchgeführt. Der Pretest ermöglicht eine Aufdeckung von Verständnisschwierigkeiten, fehlenden oder unpassenden Antwortmöglichkeiten und eine Überprüfung der Antwortbereitschaft. Zudem haben die Pretester die Möglichkeit Ergänzungen einzubringen. Die Hinweise, welche aus dem Pretest gewonnen wurden bildeten die Grundlage zur Überarbeitung des Fragebogens.<sup>203</sup> Es stellte sich heraus, dass Fragen zu monetären Kennzahlen nicht beantwortet wurden, weshalb sie aus dem Fragebogen herausgenommen wurden. Zudem traten Verständnisschwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Begriff *Energiemanagementsystem* auf. Dieser wurde im Fragebogen, sowie im weiteren Untersuchungsverlauf durch den die *zentrale technische Steuerung* ersetzt.

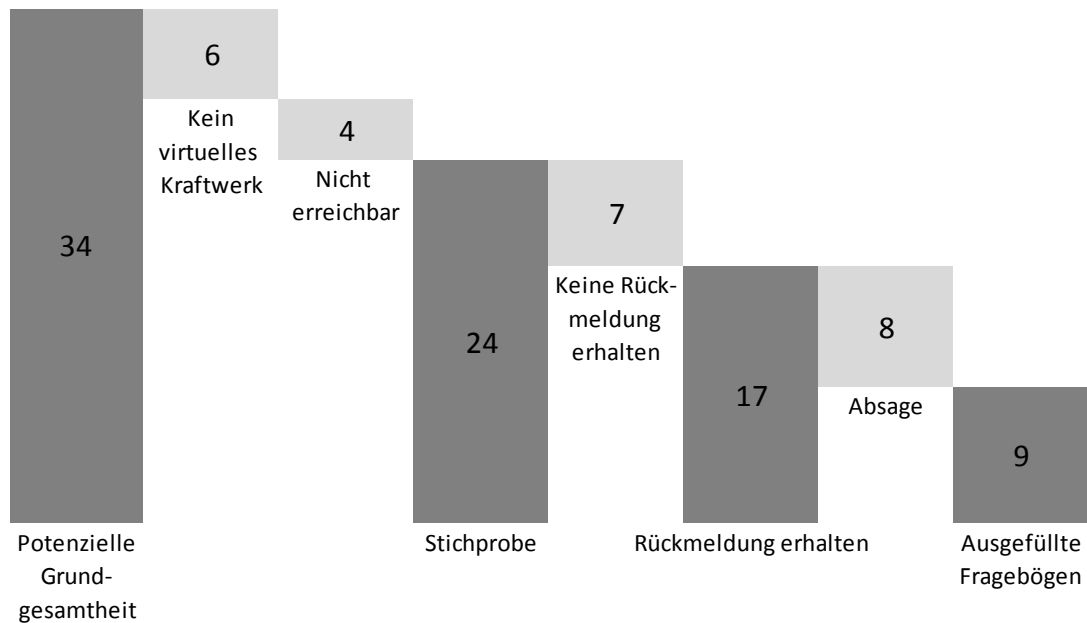
#### **4.1.7 Untersuchungsverlauf**

Nach einer achttägigen Frist wurde die Befragung am 23.05.2014 beendet. Von den 24 Kraftwerksbetreibern meldeten sich 17 zurück, während von sieben Befragten keine Rückmeldung verzeichnet wurde (siehe Abbildung 34).

Von den 17 Kraftwerksbetreibern erteilten acht eine Absage an der Befragung teilzunehmen. Die Hälfte der Absagen ließ sich auf einen zeitlichen Engpass zurückführen, während zwei weitere Absagen aus Gründen der Vertraulichkeit erteilt wurden. Die anderen Beiden lagen darin begründet, dass das VK nicht bzw. nicht mehr existiert.

---

<sup>203</sup> Vgl. (Grunwald & Hempelmann, 2012), Seite 66



**Abbildung 34: Befragungsverlauf**

Neun Befragungsteilnehmer sendeten einen ausgefüllten Fragebogen zurück. Ausgehend von den 24 Kraftwerksbetreibern, welche einen Fragebogen erhielten, wurde eine Rücklaufquote von 37,5 % erreicht.

## 4.2 Untersuchungsergebnisse

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der qualitativen Auswertung der Untersuchungsergebnisse. Die Darstellung erfolgt hypothesenweise. Die Ergebnisse konnten nicht mit weiteren Studien belegt werden, da es zum Untersuchungszeitpunkt kaum Quellen gab, welche sich mit diesem Thema befassten.

Auf Grund des geringen Stichprobenumfangs wurde auf die Verwendung von Prozentangaben weitestgehend verzichtet. Aus Gründen des Datenschutzes wurden die Namen der befragten Unternehmen und Institutionen anonymisiert. Die Verwendung der Pseudonyme U1 bis U9 stellen keine Bezüge zwischen Datensätzen her und sind im Kontext der Untersuchung variabel.

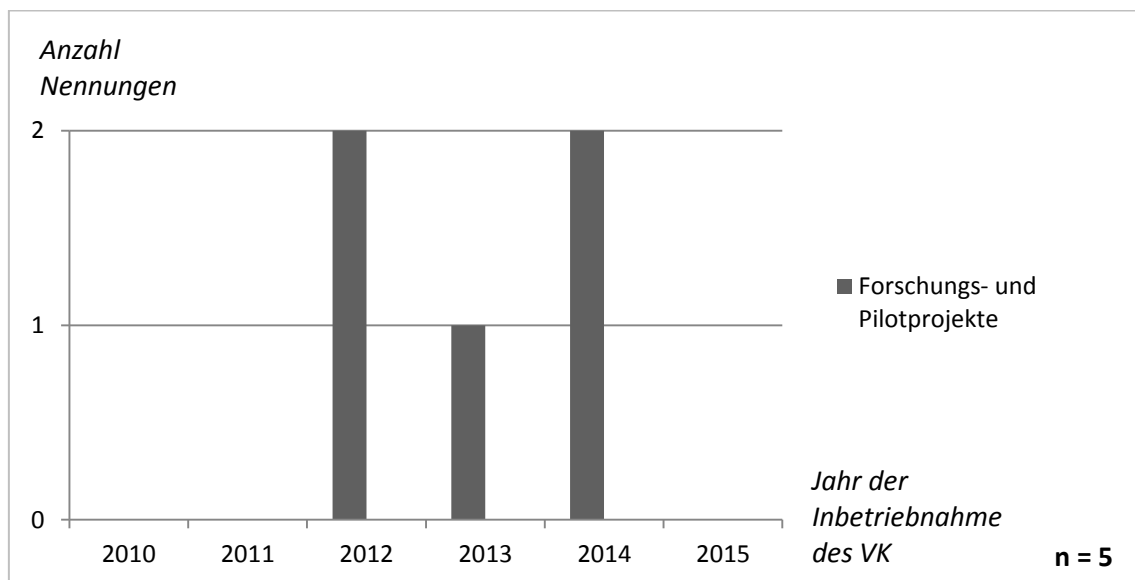
### 4.2.1 Hypothese 1: Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase.

Die Auswertung beinhaltet die Betrachtung der Entwicklungsphase des VK, sowie des technischen Entwicklungsstandes, welcher insbesondere die verwendete Software zur zentralen technischen Steuerung des Kraftwerks impliziert.

## Entwicklungsstand virtueller Kraftwerke

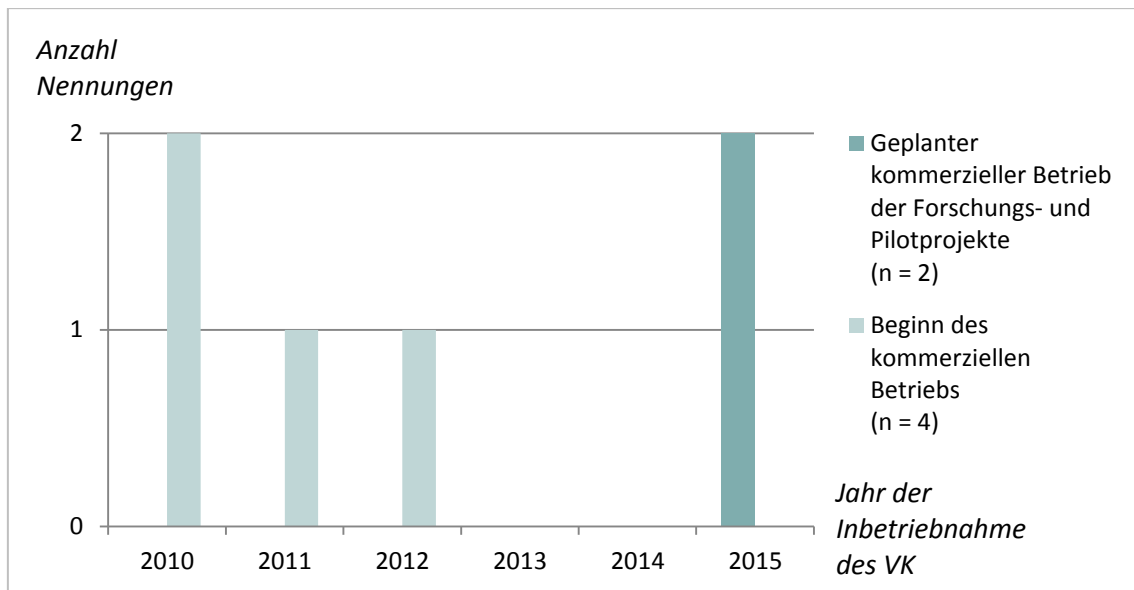
Von den neun untersuchten VK wurden vier Kraftwerke kommerziell genutzt und fünf als Forschungs- oder Pilotprojekte betrieben.

Die Inbetriebnahmen der fünf VK, welche als Forschungs- und Pilotprojekte initiiert wurden, lagen in den Jahren 2012 bis 2014 (siehe Abbildung 35). Die Betreiber waren kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) oder Forschungseinrichtungen, welche im Mittel 31 Mitarbeiter beschäftigten (*Spannweite*  $R = 74$ ), von denen durchschnittlich drei für den Betrieb des VK zuständig waren ( $R = 4$ ).



**Abbildung 35: Inbetriebnahme der Forschungs- und Pilotprojekte**

Die durchschnittliche Projektdauer betrug 1,75 Jahre ( $R = 0,5$ ). Zwei dieser Projekte sollen gemäß den Angaben der Betreiber ab dem Jahr 2015 kommerziell genutzt werden (siehe Abbildung 36).



**Abbildung 36: Beginn der kommerziellen Nutzung der virtuellen Kraftwerke**

Die vier kommerziell betriebenen VK wurden zwischen 2010 und 2012 in Betrieb genommen. Zwei davon mit Beginn der Energiewende im Jahr 2010 (siehe Abschnitt 2.2). Bei den Kraftwerksbetreibern handelte es sich um zwei mittelständische Unternehmen mit knapp 60 bzw. 470 Mitarbeitern und zwei Großunternehmen mit mehr als 8.000 Mitarbeitern. Sie gehörten zu den größeren bis größten Unternehmen, welche an der Befragung teilnahmen. Für den Betrieb kommerziell genutzter VK wurden durchschnittlich neun Mitarbeiter eingesetzt ( $R = 7$ ).

Zusammenfassend zeichneten sich zwei Phasen hinsichtlich des Entwicklungsstandes der Kraftwerke ab. Während große und ein mittelständisches Unternehmen die VK bereits kommerziell betrieben, befanden sich KMU noch in der Projektphase.

### Technischer Entwicklungsstand

Es konnte festgestellt werden, dass die Kraftwerksbetreiber, unabhängig von der Unternehmensgröße und der Entwicklungsphase des VK vielfältige Herausforderungen bewältigen müssen (siehe Tabelle 6).

<b>Forschungs- und Pilotprojekt</b>	<b>Kommerziell genutztes VK</b>
Technische Anbindung unterschiedlicher Anlagentypen und Hersteller	Sich schnell ändernde Markt- und gesetzliche Rahmenbedingungen
Entwicklung einer Fernwirktechnik für möglichst viele verschiedene Anlagentypen und Hersteller	Realisierung von technisch sicheren und zuverlässigen Lösungen
Anschaffungskosten für RLM-Zähler	Technische Komplexität
Datenkommunikation	Koordination tausender dezentraler Anlagen

**Tabelle 6: Größte Herausforderungen beim Betrieb des virtuellen Kraftwerks**

Drei der vier Betreiber kommerziell genutzter VK äußerten sich zu diesem Thema. Die angeführten Herausforderungen waren vollständig heterogen und wurden je einmal genannt. Die Betreiber benannten die sich schnell ändernden Markt- und gesetzlichen Rahmenbedingungen, die Realisierung von technisch sicheren und zuverlässigen Lösungen zu möglichst geringen Kosten, sowie die Bewältigung der technischen Komplexität und die Koordination tausender dezentraler Anlagen als besondere Herausforderungen des VK-Betriebs.

In den Forschungs- und Pilotprojekten äußerten sich drei Kraftwerksbetreiber zu den Herausforderungen. Diese bestanden in der Datenkommunikation, der Entwicklung einer kostengünstigen Fernwirktechnik, welche viele verschiedene Anlagentypen und Hersteller ansteuern kann, sowie der technische Einbindung der Anlagen und Speicher. Als wirtschaftliche Herausforderung wurden die Anschaffungskosten für Zähler zur registrierenden Lastgangmessung (RLM) benannt, welche für die Direktvermarktung benötigt werden.

Der Betrieb des VK geht mit einem erheblichen Zeitaufwand einher. Sieben Kraftwerksbetreiber äußerten sich zu den zeitaufwändigsten Prozessen beim Betrieb des Kraftwerks. Bezugnehmend auf die in Abschnitt 3.2.4 beschriebene zentrale technische Steuerung, lassen sich diese in das Umfeld der Vermarktungsebene und der lokalen Steuerung einordnen.

Sowohl ein Betreiber eines VK in der Projektphase, als auch zwei Betreiber eines kommerziell genutzten VK benannten die Anbindung technischer Einheiten, sowie den Aufbau und die Pflege der Kommunikationsverbindungen zwischen



den Anlagen und der technischen Steuerungsebene als große Zeitfaktoren beim Betrieb des Kraftwerks (siehe Tabelle 7).

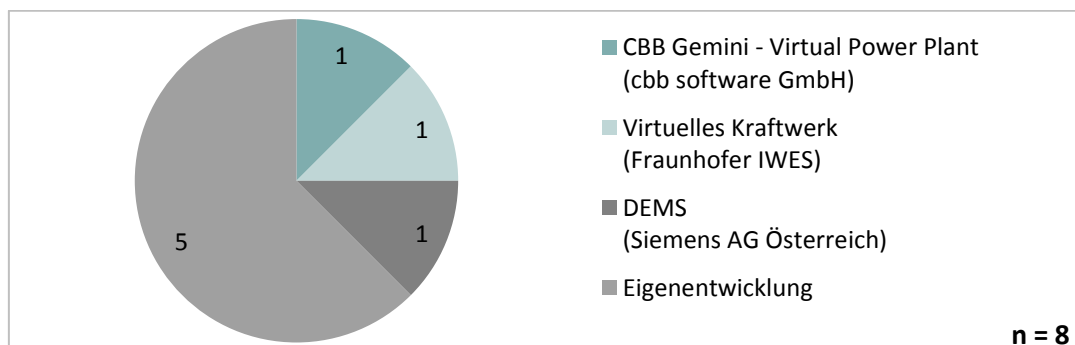
Forschungs- und Pilotprojekt	Kommerziell genutztes VK
Anbindung technischer Einheiten	Anbindung technischer Einheiten
Aufbau und Pflege der Kommunikationsverbindung	Aufbau und Pflege der Kommunikationsverbindung
Überwachung und Beseitigung von Störungen	Monitoring (systematischen Datenerfassung und Überwachung)
Entwicklung von Betriebskonzepten	Prognose- und Fahrplanerstellung
Datenkommunikation	Erweiterung der Steuerungsfunktionalitäten
	Abrechnung und Marktkommunikation

**Tabelle 7: Große Zeitaufwände beim Betrieb des virtuellen Kraftwerks**

In einem der Forschungs- und Pilotprojekte wurde die Entwicklung von Betriebskonzepten als zeitaufwendig eingestuft, während in einem anderen die Datenkommunikation einen großen Anteil einnahm. In einem weiteren Projekt wurde die Überwachung und Beseitigung von Störungen an den Anlagen als besonders zeitaufwändig genannt.

Insgesamt waren sowohl die Herausforderungen beim Betrieb des VK, als auch die Zeitaufwände sehr heterogen und überwiegend technischer Natur.

Bezüglich der eingesetzten Software zur Steuerung der dezentralen Erzeugungsanlagen machten acht Betreiber Angaben (siehe Abbildung 37).



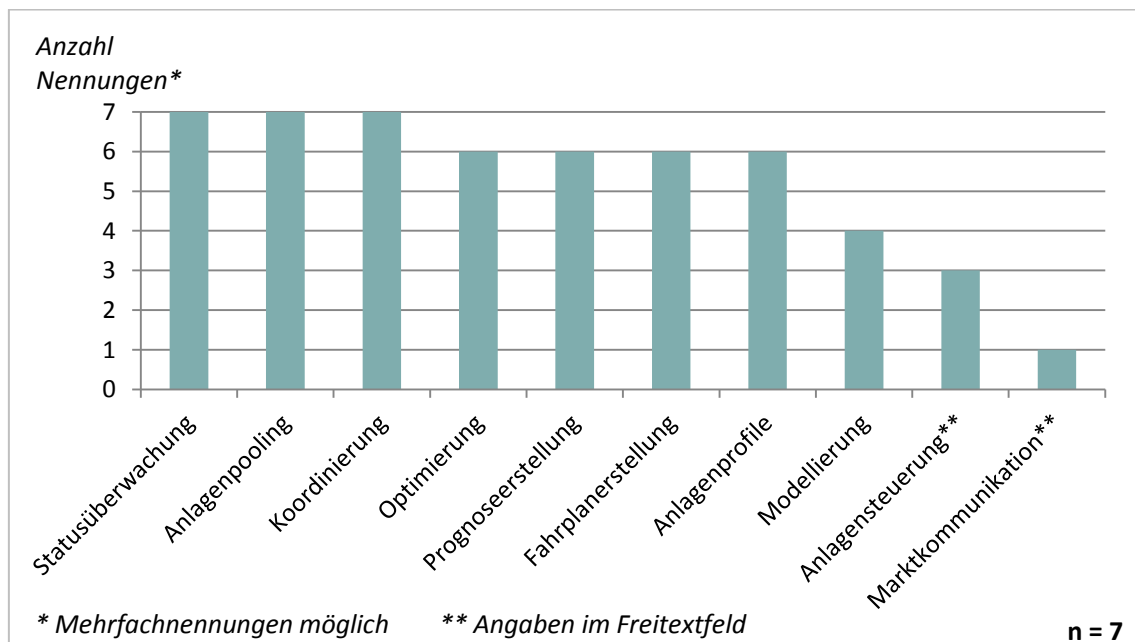
**Abbildung 37: Eingesetzte Software zur Steuerung des virtuellen Kraftwerks**

Fünf von ihnen verwendeten eine selbst entwickelte Software, während drei Betreiber auf extern entwickelte bzw. käufliche Software zurückgriffen. Es han-

delte sich um die Softwarelösungen *CBB-Gemini – Virtual Power Plant*, welche von der cbb Software GmbH entwickelt wurde, *DEMS* von der Siemens AG Österreich und eine vom Fraunhofer IWES entwickelte Informations- und Kommunikationsinfrastruktur.

Im Rahmen der Eigenentwicklungen arbeiteten zwei Unternehmen mit der energy & meteo systems GmbH zusammen, welche unter anderem eine modular aufgebaute Softwarelösunge zur Steuerung virtueller Kraftwerke vertreibt, aber auch an Forschungsvorhaben und der Entwicklung von kundenindividuellen Einzellösungen beteiligt ist<sup>204</sup>.

Es wurden von sieben Betreibern Angaben bezüglich der Softwarefunktionen gemacht (siehe Abbildung 38).



**Abbildung 38: Funktionen der eingesetzten Steuerungssoftware**

Alle Systeme waren in der Lage den Status der Erzeugungsanlagen zu überwachen, diese zu Anlagenpools zusammen zu schließen und sowohl Einzelanlagen, als auch den Anlagenpool zu koordinieren.

Wie in Abschnitt 2.3.3.2 bereits erwähnt, müssen alle Einspeise- und Entnahmestellen, welche ans öffentliche Netz angeschlossen sind, in Bilanzkreisen zusammengeschlossen sein. In § 4 der StromNZV wird eine Fahrplanerstellung

<sup>204</sup> Vgl. (energy & meteo systems GmbH, ohne Jahr)

für den Strombedarf des Folgetages im Viertelstundenraster als zwingend angesehen. Eine solche Erstellung basiert auf detaillierten Prognosen. Sechs der Softwarelösungen waren in der Lage Prognosen und Fahrpläne zu erstellen, sowie Optimierungen des Kraftwerksbetriebs vorzunehmen. Weiterhin konnten für die verschiedenen Anlagentypen Profile hinterlegt werden, welche die Steuerung der Anlagen erleichtern.

Die Modellierung des Anlagenverbunds, welche den Betreiber bei der Gestaltung einer effektiven Zusammenarbeit der Erzeugungsanlagen behilflich ist, wird von vier Softwarelösungen abgedeckt.

In einem Freitextfeld wurde den Befragten die Möglichkeit gegeben, weitere Funktionalitäten anzugeben, die von der verwendeten Software abgedeckt werden. Dreimal wurde die Funktion der Anlagensteuerung benannt und einmal die Marktkommunikation.

Insgesamt ließ sich feststellen, dass die Softwarelösungen zur zentralen Steuerung der VK die Anforderungen der Betreiber größtenteils erfüllen. Es wurde nur von einem Betreiber eine Angabe zu fehlenden Funktionen gemacht. Es handelte sich um die fehlende Abbildung von Wärmelasten und –speichern beim Betrieb eines BHKW und deren Berücksichtigung bei der Einsatzplanung. Es ist jedoch anzumerken, dass der Fokus des Kraftwerksbetriebs mit sechs Windenergieanlagen und einem BHKW auf der Energieerzeugung aus Windkraft liegt.

## **Folgerungen und Entscheidungsfindung**

Im Rahmen der Untersuchung wurde festgestellt, dass sich virtuelle Kraftwerke in der Erprobungsphase befinden. Folgende Gründe führten zu dieser Entscheidung:

Zunächst sind virtuelle Kraftwerke ein relativ neues Konzept, welches erst mit dem Beginn der Energiewende im Jahr 2010 ein großes Potenzial erreichte. Die Entwicklungs- und Erprobungszeit ist dementsprechend kurz.

Weiterhin wurden VK seit dem Jahr 2010 zunächst von großen bis mittelgroßen Unternehmen initiiert, welche im Vergleich zu KMU über größere finanzielle Ressourcen verfügen. KMU traten erst seit dem Jahr 2012 in Form von For-

schungs- und Pilotprojekten auf dem Markt in Erscheinung. In der Untersuchung handelte es sich in fünf von neun Fällen um Forschungs- oder Pilotprojekte, während vier kommerziell genutzt wurden. Zudem gab es lediglich für zwei Projekte einen Starttermin zur kommerziellen Nutzung.

Ein weiterer Grund davon auszugehen, dass sich VK in der Erprobungsphase befinden war die Tatsache, dass die Kraftwerksbetreiber, unabhängig von der Unternehmensgröße und der Entwicklungsphase des VK angaben, verschiedene Herausforderungen meistern zu müssen und noch viel Zeit mit der Vernetzung und zentrale Steuerung der Anlagen verbringen würden. Insgesamt handelte es sich bei VK in der Projektphase um Herausforderungen zur Herstellung der Betriebsfähigkeit, während kommerziell betriebene VK mehrheitlich Herausforderungen im täglichen Betrieb benannten. Die genannten Herausforderungen waren zwar sehr heterogen, jedoch war insbesondere die Komplexität des Kraftwerkbetriebs ein zentrales Thema das noch viel Entwicklungs- und Erprobungsbedarf mit sich bringt.

Bezüglich der Software zur zentralen Steuerung des Kraftwerks wurde eruiert, dass die eingesetzten Softwarelösungen prinzipiell viele Softwarefunktionen unterstützten. Es nannte nur ein Betreiber Funktionen, welche er sich zusätzlich wünschen würde. Jedoch handelt es sich bei den fehlenden um wichtige Grundfunktionen, wie die Prognose- und Fahrplanerstellung.

Insgesamt überwogen die Argumente, hinsichtlich des allgemeinen und technischen Entwicklungsstandes, dass sich VK in der Erprobungsphase befinden. Die Hypothese wurde angenommen.

#### **4.2.2 Hypothese 2: Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum.**

Wie in der Hypothesenbeschreibung (siehe 4.1.4) bereits angeführt, sollte das Marktwachstum anhand der drei Kriterien Anlagenintegrationen, Konkurrenzempfinden der Kraftwerksbetreiber, sowie Absatzmärkte und Marktpotenzial festgestellt werden.

## Anlagenintegrationen

Sieben Kraftwerksbetreiber äußerten sich bezüglich ihrer Integrationspläne in neue Erzeugungsanlagen, Energiespeicher und Verbraucher im Jahr 2015. Da keine finanziellen Kennzahlen über die Investitionssummen und die Anzahl der Anlagen vorlagen, konnte nur auf die Anlagentypen Bezug genommen werden.

Hinsichtlich der Anlagenintegrationen im Jahr 2015 wollten fünf der sieben Kraftwerksbetreiber ihre VK um BHKW erweitern (siehe Tabelle 8).

		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Erzeugungsanlagen	KWK / BHKW				*			*		
	Windkraftanlage				*			*		
	Wasserkraftanlage				*			*		
	Photovoltaikanlage				*			*		
	Biogasanlage				*			*		
	Biomassekraftwerk				*			*		
	Notstromaggregate				*			*		
Speicher	Power-to-Gas				*			*		
	Schwungradspeicher				*			*		
	Sonstige Speicher				*			*		
Verbraucher	Power-to-Heat				*			*		
	Kältemaschine				*			*		
	Wärmepumpe				*			*		
	Sonstige Verbraucher				*			*		

\* Es wurden keine Angaben gemacht

**Tabelle 8: Geplante Anlagenintegrationen im Jahr 2015**

Während in den Kraftwerkspools von U2, U3 und U5 bereits BHKW integriert waren, würde U8 diese erstmals in den Pool aufnehmen. U8 hatte bisher nur Windenergieanlagen integriert. Zudem wurde von U8 angestrebt das VK im Jahr 2015 um Photovoltaik- und Biogasanlagen zu ergänzen. Es war eines von zwei VK, in welche im Jahr 2015 Speicher integriert werden sollen.

Unter den Kraftwerksbetreibern stach U5 zum einen durch die geplante Integration eines Schwungradspeichers hervor und zum anderen durch die Vielfältigkeit der geplanten Anlagenintegrationen. Werden diese den bereits im Einsatz befindlichen Erzeugungsanlagen gegenübergestellt, so ist jedoch erkennbar, dass der Anlagenpool im Jahr 2015 lediglich aufgestockt wird und keine neuen Anlagentypen hinzukommen.

U3 plante die bisher eingesetzten BHKW um Notstromaggregate zu ergänzen. U1 und U6 wollten im Jahr 2015 jeweils weitere BHKW integrieren. Lediglich U9 plante keinerlei Integration von Erzeugungsanlagen.

Zudem planten fünf der sieben Befragten ihre VK durch die Integration von Verbrauchern zu erweitern. Darunter Power-to-Heat, Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Zu den langfristigen Planungen äußerten sich fünf Kraftwerksbetreiber. Von diesen wollten drei langfristig in weitere BHKW investieren (siehe Tabelle 9).

		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Erzeugungsanlagen	KWK / BHKW		*		*	*		*		
	Windkraftanlage		*		*	*		*		
	Wasserkraftanlage		*		*	*		*		
	Photovoltaikanlage		*		*	*		*		
	Biogasanlage		*		*	*		*		
	Biomassekraftwerk		*		*	*		*		
	Notstromaggregate		*		*	*		*		
	Kl. Erzeugungsanlagen		*		*	*		*		
Speicher	Power to Gas		*		*	*		*		
	Batterie		*		*	*		*		
	Schwungradspeicher		*		*	*		*		
	Sonstige Speicher		*		*	*		*		
Verbraucher	Power to Heat		*		*	*		*		
	Kühlhäuser		*		*	*		*		
	Wärmepumpe		*		*	*		*		
	Lüftungsanlagen		*		*	*		*		
	Sonstige Verbraucher		*		*	*		*		

\* Es wurden keine Angaben gemacht

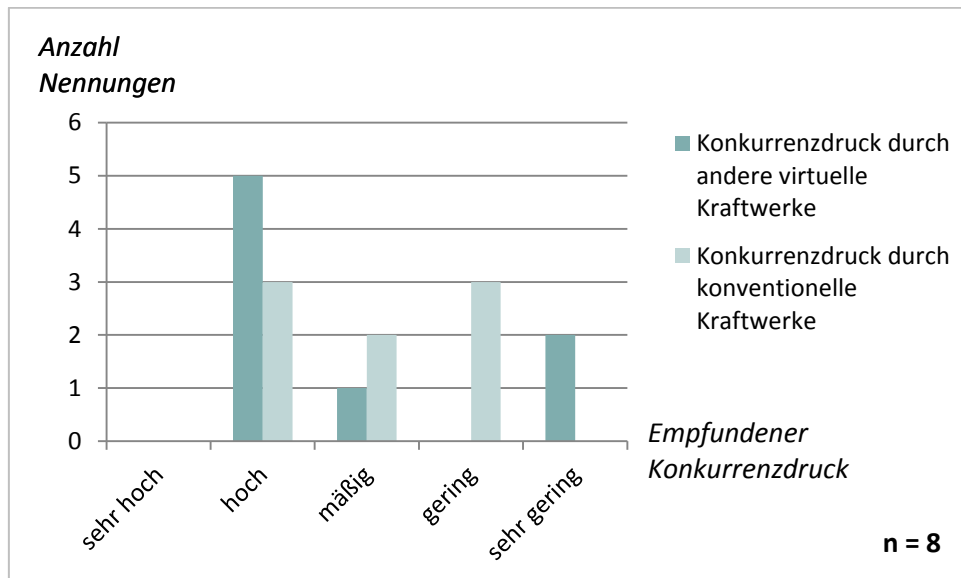
**Tabelle 9: Langfristig geplante Anlagenintegrationen**

Während U3 parallel Notstromaggregate integrieren möchte, plante U6 den Anlagenpool um Windkraftanlagen zu ergänzen. U8 wollte langfristig lediglich die Anzahl der Biogasanlagen aufstocken, sowie als einziges VK Energiespeicher (P2G und Batterien) integrieren.

U1 und U3 planten die Verbraucher auch langfristig zu ergänzen. U1 möchte Kühlhäuser, Wärmepumpen und Lüftungsanlagen in das VK aufnehmen, während U3 auf Wärmepumpen und Power to Heat setzte.

## Konkurrenzempfinden

Sieben Kraftwerksbetreiber äußerten sich zu ihrem empfundenen Konkurrenzdruck durch andere VK und konventionelle Kraftwerke (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39: Konkurrenzempfinden**

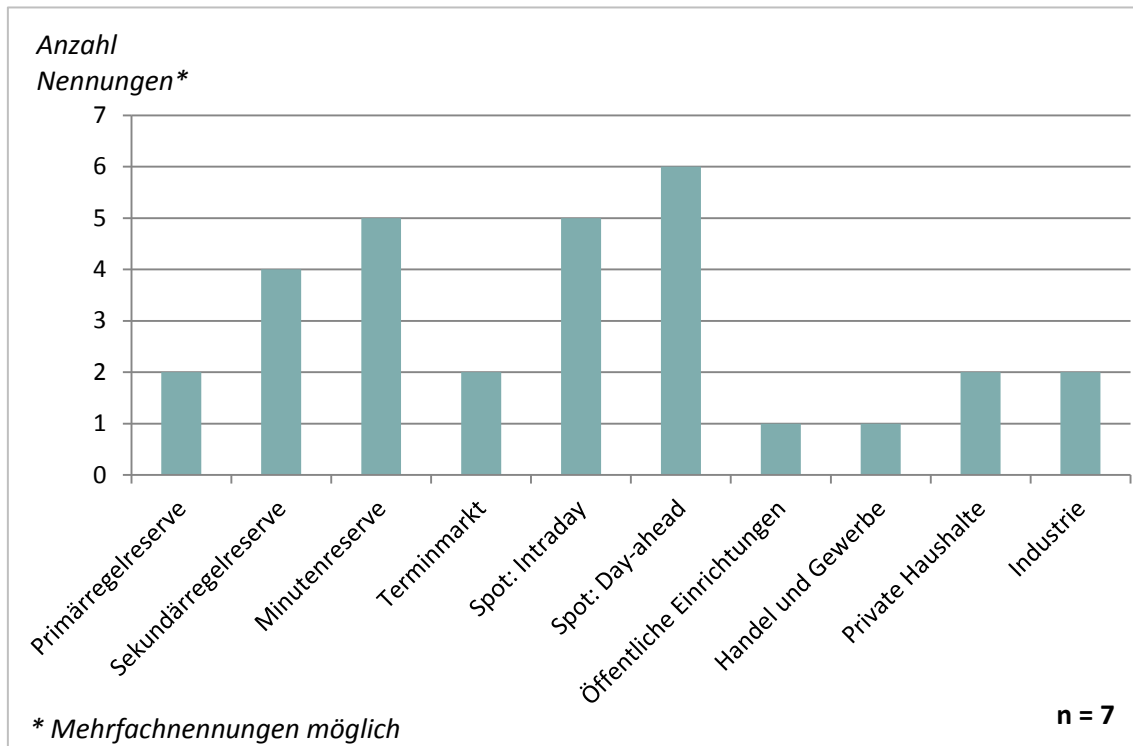
Fünf Betreiber empfanden den Konkurrenzdruck durch andere VK als hoch, während ihn zwei als sehr gering ansahen. Anders verhielt es sich mit dem Konkurrenzdruck durch konventionelle Kraftwerke. Dieser wurde dreimal hoch wahrgenommen, zweimal mäßig und dreimal gering.

Vier der fünf VK, welche einen hohen Konkurrenzdruck durch andere virtuelle Kraftwerke empfanden, wurden kommerziell betrieben. Hinsichtlich des Konkurrenzdrucks durch konventionelle Kraftwerke sind es ebenfalls die kommerziell genutzten VK, welche einen hohen bis mäßigen Konkurrenzdruck empfanden. In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass kommerziell genutzte VK den Strom überwiegend an der Börse handelten und kaum Direktabnahmen durch private Haushalte oder Unternehmen stattfanden.

## Absatzmärkte und Marktpotenzial

Die Vermarktungsmöglichkeiten des im VK erzeugten Stroms sind vielfältig. Bis auf einen Kraftwerksbetreiber agierten alle Befragten auf mehreren Märkten

gleichzeitig. Im Rahmen der Untersuchung stellte sich der Börsenhandel (siehe Abschnitt 2.3.5.2), insbesondere der Spotmarkt (sowohl Intraday, als auch Day-ahead), als besonders beliebt heraus. Sechs Kraftwerksbetreiber veräußerten den erzeugten Strom auf dem Day-ahead-Markt und fünf auf dem Intraday-Markt (siehe Abbildung 40). Auf dem Terminmarkt handelten hingegen nur zwei Betreiber.



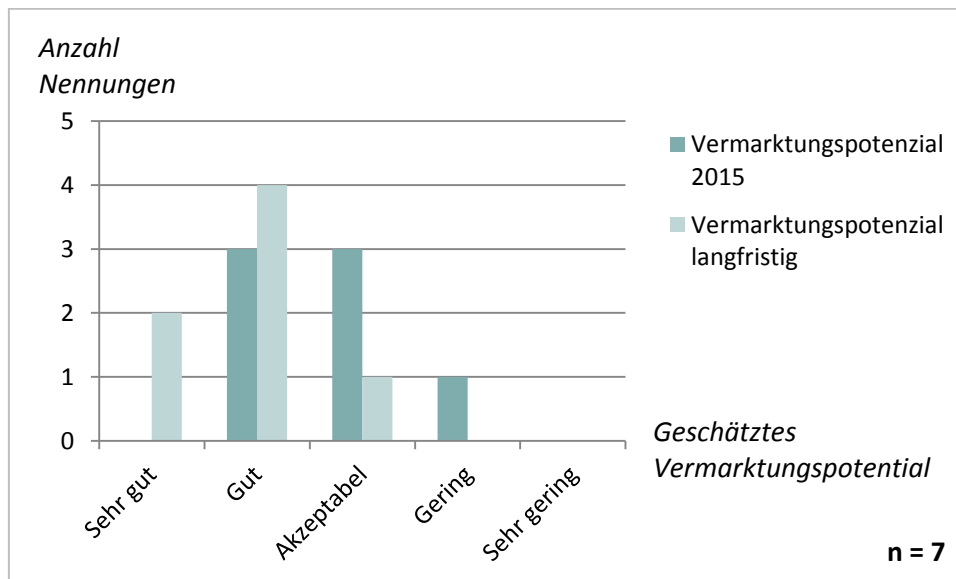
**Abbildung 40: Absatzmärkte des erzeugten Stroms**

Als ähnlich beliebt stellte sich der Markt für Regelleistungen heraus. Fünf Betreiber veräußerten den Strom als Minutenreserve, vier als Sekundärregelreserve und zwei als Primärregelreserve (siehe Abschnitt 2.3.3.3).

Wie bereits erwähnt, handelte es sich bei den VK, welche den Strom an der Börse oder als Ausschreibung von Regelleistung veräußerten, weitestgehend um kommerziell genutzte Kraftwerke. Forschungs- und Pilotprojekte waren hingegen überwiegend mit öffentlichen Einrichtungen, privaten Haushalten oder Unternehmen verbunden, welche den Strom direkt abnahmen.



Drei von sieben Kraftwerksbetreibern schätzten das Vermarktungspotenzial im Jahr 2015 gut ein, während es drei weitere es akzeptabel nannten. Lediglich ein Betreiber schätzte es gering ein (siehe Abbildung 41).



**Abbildung 41: Geschätztes Vermarktungspotenzial virtueller Kraftwerke**

Bezüglich der langfristigen Entwicklung des Vermarktungspotenzials äußerten sich die Betreiber noch positiver. Zwei Befragte schätzten es sehr gut ein, vier gut und einer akzeptabel.

Obwohl das Vermarktungspotenzial langfristig als sehr gut bis gut eingeschätzt wurde, strebten nur zwei von sieben Kraftwerksbetreibern, die sich zu ihren Internationalisierungsplänen äußerten, eine internationale Ausweitung des VK an. Während ein Betreiber Österreich und Schweiz als Zielländer benannte, machte ein anderer keine konkreten Angaben. Es sollen jedoch Nachbarländer Deutschlands werden, wie Polen, Belgien oder Frankreich.

### **Folgerungen und Entscheidungsfindung**

Als Entscheidungsgrundlage wurden die drei Kategorien Anlagenintegration, Konkurrenzempfinden, sowie Absatzmärkte und Marktpotenzial herangezogen.

Die sieben Kraftwerksbetreiber, welche sich zu ihren Integrationsplänen äußerten gaben an, sowohl im Jahr 2015, als auch langfristig neue Anlagen in ihr VK aufnehmen zu wollen. Daraus kann geschlossen werden, dass der Markt genug

Potenzial aufweist und von den Kraftwerksbetreibern als zukunftssträftig erachtet wird.

Der Markt für VK sollte als junger Wachstumsmarkt viele Wettbewerber anziehen, so dass die Betreiber einen Konkurrenzdruck spüren. Fünf der acht Betreiber bestätigten dies und gaben an, einen hohen Konkurrenzdruck durch andere VK zu empfinden. Bei ihnen handelte es sich überwiegend um kommerziell genutzte Kraftwerke, welche zudem überwiegend an der Börse und auf dem Regelleistungsmarkt agierten.

Die Vermarktungsformen waren sehr heterogen, wobei der Spotmarkt bevorzugt genutzt wurde. VK haben gegenüber den konventionellen Kraftwerken den Vorteil, dass die erzeugte Energie vorrangig abgenommen wird. Zwei der Forschungs- und Pilotprojekte planten im Jahr 2015 ebenfalls den kommerziellen Betrieb. Es ist davon auszugehen, dass sie dann ebenfalls an der Börse und dem Regelleistungsmarkt handeln werden. Die steigende Anzahl an Wettbewerbern und die hohe Marktattraktivität deuten auf einen wachsenden Markt hin.

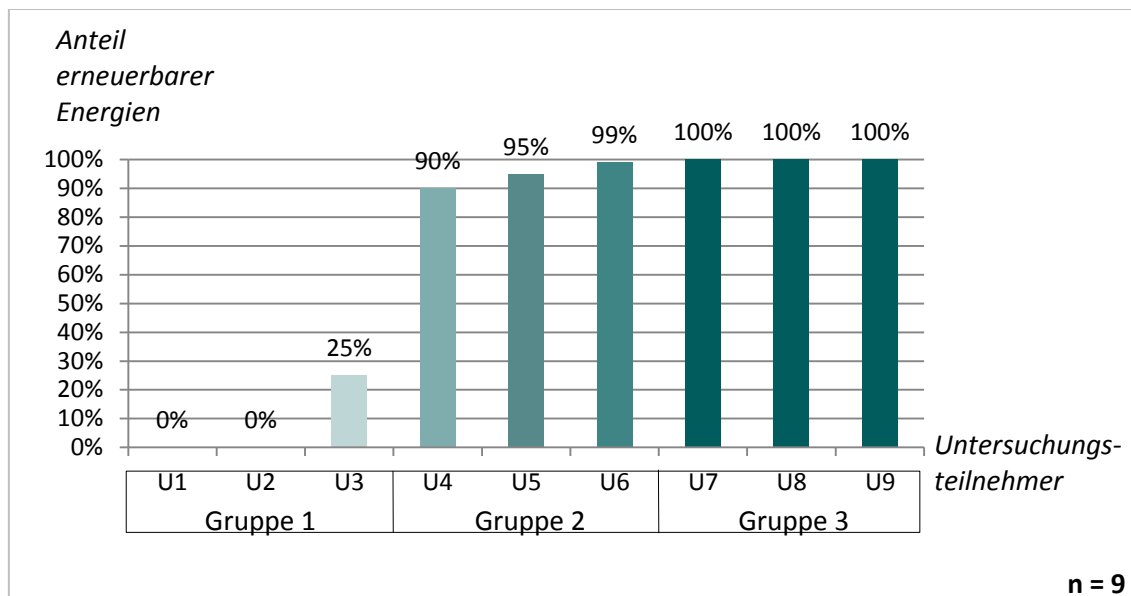
Drei der sieben Betreiber, welche sich zum Vermarktungspotenzial äußerten, schätzten dieses im Jahr 2015 gut ein, drei weitere akzeptabel. Langfristig wurde jedoch von einem steigenden Potenzial ausgegangen. So schätzten zwei Befragte das langfristige Vermarktungspotenzial als sehr gut ein und vier als gut. Trotz der positiven Erwartungen planten nur zwei von sieben Betreibern einen internationalen Ausbau der VK.

Insgesamt gingen die befragten Kraftwerksbetreiber von einem wachsenden Markt aus und sahen positiv der Zukunft entgegen. Hinzu kommt die Tatsache, dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Energieerzeugung in Deutschland bis 2020 um 35 % steigen soll. Die Hypothese wurde daher angenommen.

#### **4.2.3 Hypothese 3: Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben.**

Die Untersuchung des Anteils erneuerbarer Energien ergab drei Gruppierungen, in welche sich jeweils drei VK einordnen ließen. Gruppe 1 bildeten Kraftwerke, welche einen Anteil von 0 bis 25 % erneuerbarer Energien aufwiesen. Gruppe 2 bestand aus Kraftwerken, welche einen Anteil zwischen 90 und 99 %

erreichten und Kraftwerke aus Gruppe 3 wurden ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben (siehe Abbildung 42). Die in der Auswertung angegebenen Anlagentypen waren in der Befragung nicht vorgegeben und wurden von den Kraftwerksbetreibern in Freitextform eingetragen.



**Abbildung 42: Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in den virtuellen Kraftwerken**

Alle Kraftwerke der Gruppe 1 setzten ausschließlich KWK-Anlagen – insbesondere BHKW – zur Stromerzeugung ein. Der Anteil erneuerbarer Energien lag in zwei Fällen bei 0% und in einem Fall bei 25 %. Die VK wurden ausschließlich bzw. überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben (siehe Tabelle 10).

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
KWK / BHKW									
Windkraftanlage									
Wasserkraftanlage									
Photovoltaikanlage									
Biogasanlage									
Biomassekraftwerk									
Notstromaggregate									
Anteil erneuerbarer Energien	0%	0%	25%	90%	95%	99%	100%	100%	100%

**Tabelle 10: Integrierte Erzeugungsanlagen in den virtuellen Kraftwerken**

U1 gab diesbezüglich an, dass es sich um erdgasbefeuerte BHKW handle, welche für das VK-Projekt ausgewählt wurden, da sie im Anlagenbestand die

Mehrheit ausmachten. U3 erklärte den hohen Anteil fossiler Brennstoffe damit, dass nur steuerbare Erzeugungsanlagen in das Projekt aufgenommen würden und sich Windkraft- und Photovoltaikanlagen in einem anderen Anlagenpool befänden.

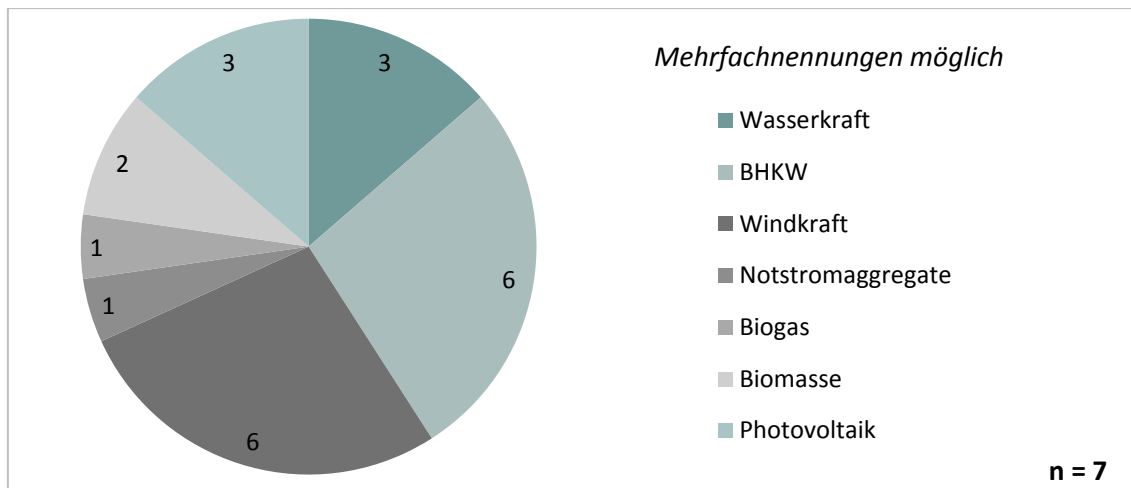
Im Gegensatz zu Gruppe 1 wurden in Gruppe 2 neben den KWK-Anlagen verschiedene Erzeugungsanlagen eingesetzt.

In das Kraftwerk U4 wurden neben den KWK-Anlagen auch Windkraft-, Wasserkraft-, Photovoltaik- und Biogasanlagen integriert. Durch diesen Anlagenmix konnte ein Anteil von 90 % erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung erreicht werden. Ähnlich verhielt es sich mit U5. Anstelle einer Biogasanlage, wurden jedoch ein Biomassekraftwerk, sowie ein Notstromaggregat integriert. U4 und U5 wiesen, im Vergleich zu den anderen VK, eine besonders große Anlagenvielfalt auf.

U6 bestand lediglich aus KWK- und Windenergieanlagen, wies mit 99 % jedoch den höchsten Anteil erneuerbarer Energien in Gruppe 2 auf. Der Kraftwerksbetreiber erklärte, dass der Einsatz von 1 % fossiler Brennstoffe auf ein erdgasbetriebenes BHKW zurückzuführen sei, da dieses flexibel geregelt werden könne. Der Einsatz von Erdgas wurde damit begründet, dass Biomethan und Biogas, auf Grund der damit mehrheitlich verbundenen Massentierhaltung, nicht den Vorstellungen des Unternehmens von gutem Strom entspräche.

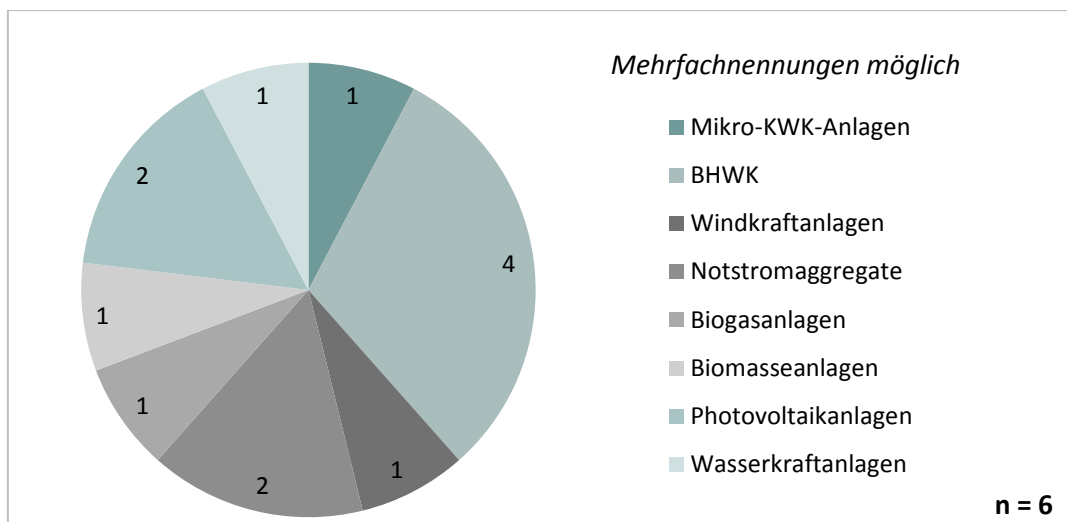
Alle Kraftwerke aus Gruppe 3 erzeugten Strom aus Windenergie. Während die VK der Befragten U8 und U9 ausschließlich aus Windenergieanlagen bestanden, setzte U7 zudem Wasserkraft-, Biomasse- und Photovoltaikanlagen zur Stromerzeugung ein.

Insgesamt wurde festgestellt, dass BHKW und Windkraftanlagen mit sechs Nennungen die am häufigsten genannten Anlagentypen waren, welche in VK integriert wurden (siehe Abbildung 43). Darauf folgten Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen mit jeweils drei Nennungen, sowie Biomassekraftwerke mit zwei Nennungen. Notstromaggregate und Biogasanlagen befanden sich jeweils in einem der neun VK.



**Abbildung 43: Integrierte Erzeugungsanlagentypen**

Bezüglich der kurzfristigen Integrationspläne von Erzeugungsanlagen äußerten sich sechs Kraftwerksbetreiber. In vier VK sollen im Jahr 2015 weitere BHKW integriert werden, während nur in einem Kraftwerk Windkraftanlagen hinzukommen sollen (siehe Abbildung 44).



**Abbildung 44: Integrationen von Erzeugungsanlagentypen im Jahr 2015**

### Folgerungen und Entscheidungsfindung

Erneuerbare Energien sind, neben der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Effizienzsteigerung der Energieerzeugung, das zentrale Thema der Energiewende. Dennoch wurden insbesondere KWK-Anlagen, welche, neben Windkraftanlagen, zu den am häufigsten eingesetzten Anlagentypen gehörten, überwiegend oder vollständig mit fossilen Brennstoffen betrieben. Sofern KWK-

Anlagen in das Kraftwerk integriert waren, wurde kein Anteil von 100 % erneuerbarer Energien erreicht.

Daraus ergab sich die Folgerung, dass KWK-Anlagen die Ursache sind, dass VK nicht vollständig mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Dies könnte darin begründet liegen, dass VK-Betreiber zwei Ziele der Energiewende verfolgen. Zur Effizienzsteigerung werden KWK-Anlagen eingesetzt und zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien vor allem Windkraftanlagen. Sofern letztere in das VK integriert waren, lag der Anteil erneuerbarer Energien bei über 90 %, wenn zudem KWK-Anlagen vorhanden waren und bei 100 % wenn diese fehlten. Es wurde gezeigt, dass der Betrieb eines VK ausschließlich mit erneuerbaren Energien möglich ist.

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der VK wurde festgestellt, dass der Trend KWK-Anlagen ins Kraftwerk zu integrieren im Jahr 2015 anhalten wird. Insgesamt überwiegt jedoch die Integration von Anlagentypen, welche mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Dennoch wird es auch in Zukunft keine hundertprozentig erneuerbare Energieerzeugung im VK geben. Die Hypothese, dass virtuelle Kraftwerke nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben werden, konnte bestätigt werden.

#### **4.2.4 Hypothese 4: Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung.**

Die Hypothese sollte anhand von Definitionen der Kraftwerksbetreiber zum virtuellen Kraftwerk, sowie der tatsächlich integrierten Komponenten überprüft werden.

#### **Definition eines virtuellen Kraftwerks in der Praxis**

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, beinhalten VK gemäß den verschiedenen Definitionsansätzen aus der Theorie mehrere bzw. alle der vier folgenden Komponenten: kleine dezentrale Energieerzeugungsanlagen, integrierte Verbraucher, Energiespeichertechnologien, sowie einer zentralen technischen Steuerung. Zur Überprüfung der These gaben die Kraftwerksbetreiber eine eigene Definition an (siehe Anhang C – Definitionen).

Die Definitionen wurden auf die Nennung der vier Komponenten überprüft (siehe Tabelle 11)

	Dezentrale Erzeugungsanlagen	Energiespeicher	Verbraucher	Steuerungszentrale
Nennungen in den Definitionen	7	1	5	9

**Tabelle 11: Komponenten virtueller Kraftwerke laut Definitionen der Kraftwerksbetreiber**

Sieben der neun Betreiber nannten in ihrer Definition eines virtuellen Kraftwerks dezentrale Energieerzeugungsanlagen, während einer von technischen Einheiten zur Erzeugung sprach und ein anderer von Kraftwerken unterschiedlicher Erzeugungsarten. Die Erzeugungseinheiten wurden in beiden Fällen nicht näher spezifiziert und könnten daher auch zentrale Erzeugungsanlagen implizieren.

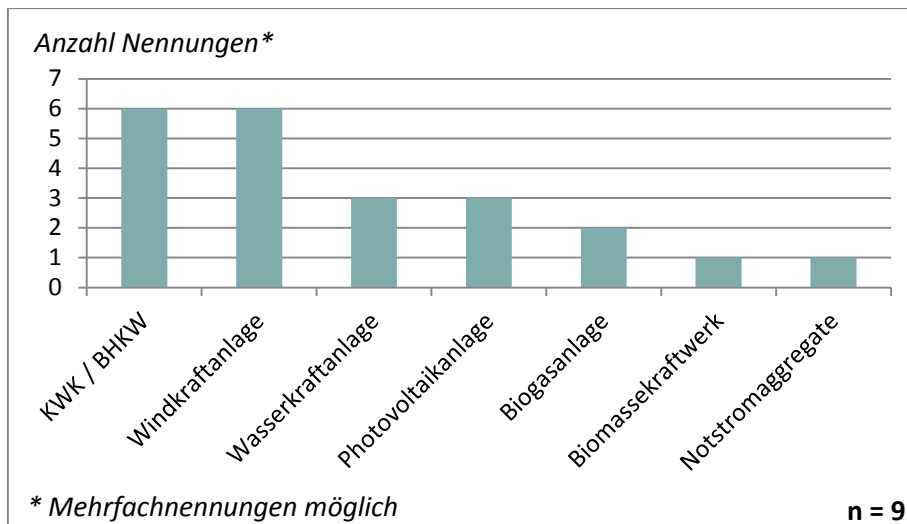
In fünf der neun Definitionen wurden Verbraucher erwähnt, während in einer Energiespeicher aufgeführt wurden.

Hinsichtlich des Vorhandenseins einer zentralen technischen Steuerung waren sich hingegen alle neun Befragten einig, wobei die Beschreibung sehr unterschiedlich ausfiel und mehr oder weniger direkt formuliert war. Während zwei Betreiber in ihrer Definition von einer zentralen Steuerung(seinheit) sprachen, wurde sie von anderen als „intelligente Verschaltung“, „gekoppelter Betrieb“ oder „virtuelle und kommunikative Vernetzung“ umschrieben.

Insgesamt wurde festgestellt, dass die Definitionen der Kraftwerksbetreiber von denen der Theorie abweichen, insbesondere in Bezug auf die Verwendung von Energiespeichern.

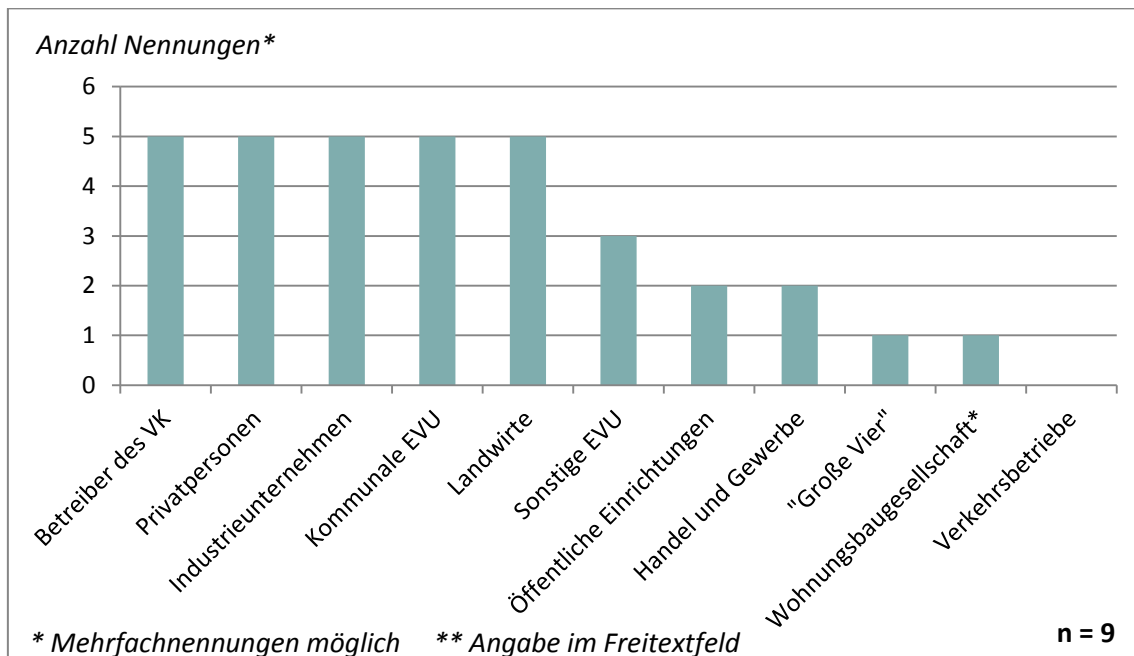
### **Komponenten virtueller Kraftwerke in der Praxis**

Neben der Definition wurden die Kraftwerksbetreiber nach den einzelnen Komponenten befragt, welche in die VK integriert wurden. Wie in Hypothese 3 bereits erwähnt wurde, waren BHKW, sowie Windkraftanlagen die am häufigsten integrierten Erzeugungsanlagen in den neun untersuchten VK, gefolgt von Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen (siehe Abbildung 45).



**Abbildung 45: Integrierte Erzeugungsanlagen**

Insgesamt handelte es sich jedoch überwiegend um dezentrale Erzeugungsanlagen. Als Eigentümer der Erzeugungsanlagen wurden mit jeweils fünf Nennungen die Betreiber der VK benannt, sowie Privatpersonen, Industrieunternehmen, kommunale EVU und Landwirte (siehe Abbildung 46). Sonstige EVU wurden von drei Befragten als Eigentümer angegeben.

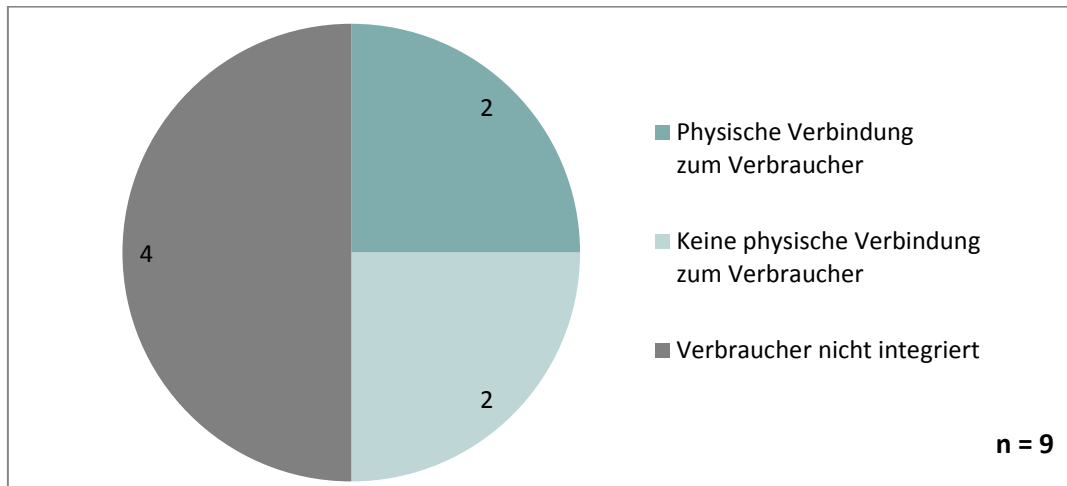


**Abbildung 46: Eigentümer der Erzeugungsanlagen**

Obwohl die Befragten angaben, dass viele Privatpersonen und Unternehmen Eigentümer der Erzeugungsanlagen seien, bestand nur in zwei Fällen eine phy-



sische Direktverbindung zwischen dem VK und den Verbrauchern (siehe Abbildung 47).



**Abbildung 47: Verbindungen zum Verbraucher**

Es handelte sich um private Haushalte und Industrieunternehmen. Letztere waren die einzigen Verbraucher, bei welchen verbraucherseitige Regulierungsmaßnahmen in Form von DMS stattfanden (siehe Abschnitt 3.2.2). Über die Anzahl der integrierten Verbraucher wurde keine Aussage getroffen.

In zwei weiteren Fällen waren Verbraucher zwar Teil des VK, jedoch ohne eine physische Direktverbindung zum Kraftwerk (siehe Abschnitt 3.2.2).

Fünf der neun befragten Kraftwerksbetreiber gaben an Energiespeicher (siehe Abschnitt 3.2.3) im Kraftwerksbetrieb zu verwenden. U1 gab an thermische Speicher mit einer maximalen Speicherkapazität von mehreren Terawattstunden zu verwenden, während U2 ein Pumpspeicherwerk betrieb, welches etwa eine Gigawattstunde Speicherkapazität hatte. U3 hatte die größte Anlagenvielfalt. Es waren Lithium-Ionen-Batterien, Warmwasser- und Wärmespeicher, sowie Power-to-Gas in das VK integriert.

Ein Vergleich der angeführten Definitionen der Kraftwerksbetreiber mit den tatsächlich integrierten Komponenten ergab in Bezug auf die Energiespeicher erhebliche Abweichungen (siehe Tabelle 12).

	Dezentrale Erzeugungsanlagen	Energiespeicher	Verbraucher	Steuerungszentrale
Nennungen in den Definitionen	7	1	5	9
Tatsächlich integrierte Komponenten	9	5	3	9

**Tabelle 12: Komponenten im Theorie- und Praxisvergleich**

Entgegen der Erwartung, dass die Kraftwerke nur wenige Energiespeicher verwenden, da diese nicht in den Definitionen angeführt wurden, kamen sie in der Praxis vermehrt zum Einsatz.

### **Folgerungen und Entscheidungsfindung**

Die Untersuchung ergab, dass sich die befragten Kraftwerksbetreiber bezüglich der Definition des virtuellen Kraftwerks zum einen selbst nicht sicher sind und zum anderen eine Uneinigkeit besteht. Dies bestätigt die in Abschnitt 3.2 angeführte Aussage, dass derzeit keine einheitliche Definition zum Begriff des virtuellen Kraftwerks existiert.

Der Vergleich der tatsächlich integrierten Komponenten mit den Definitionsansätzen aus der Praxis ergab, dass dezentrale Erzeugungsanlagen und eine Steuerungszentrale immer Bestandteile der VK sind, während Energiespeicher und Verbraucher optional vorkommen.

Da die untersuchten virtuellen Kraftwerke nicht immer aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung bestanden, wurde die Hypothese abgelehnt.

## 5 Schlussbetrachtung

Im Rahmen der Energiewende sollen bis 2030 mehr als die Hälfte des deutschen Stroms aus regenerativen Energiequellen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen stammen. In der Untersuchung wurde festgestellt, dass sich virtuelle Kraftwerke grundsätzlich eignen die Ziele der Energiewende umzusetzen. Virtuelle Kraftwerke können sowohl dazu beitragen den Anteil erneuerbarer Energieerzeugung zu steigern, als auch die Effizienz der Erzeugungsanlagen zu erhöhen. Zur Effizienzsteigerung eignen sich vorzugsweise KWK-Anlagen, da diese Verlustenergie, welche in Form von Wärme anfällt, größtenteils nutzbar machen. Der Nachteil von KWK-Anlagen besteht darin, dass sie in der Praxis überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Da KWK-Anlagen in Zukunft vermehrt in VK integriert werden sollen, ist es sinnvoll diese mit erneuerbaren Energien zu betreiben.

Die Bedeutung von KWK-Anlagen wurde zu Beginn der Untersuchung unterschätzt, weshalb das Thema Wärmenutzung und die Besonderheiten der KWK nicht näher betrachtet wurden.

Da es sich bei dem Markt für virtuelle Kraftwerke um einen wachsenden Markt handelt, verspüren vorwiegend die kommerziellen VK-Betreiber einen hohen Konkurrenzdruck, obwohl sie als Absatzmärkte vorzugsweise die Strombörse und den Markt für Regelleistungen nutzen und den erzeugten Strom bevorzugt ins öffentliche Netz einspeisen dürfen. Die Konkurrenz wird in den kommenden Jahren sogar noch zunehmen, da einige VK-Projekte in die kommerzielle Nutzung übergehen. Für den deutschen Markt gingen die Kraftwerksbetreiber von einem steigenden Vermarktungspotenzial aus. In diesem Zusammenhang war nicht ersichtlich, warum die Markterschließung sich bei vielen Betreibern nur auf den deutschen Markt beschränkte, da das Thema der erneuerbaren Energien europaweit diskutiert wird und auf allen Märkten ein Wachstum zu erwarten ist.

Hinsichtlich der Hypothesenüberprüfung wurden drei Hypothesen angenommen und eine abgelehnt (siehe Tabelle 13).

Annahmen	Hypothese 1: Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase. Hypothese 2: Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum. Hypothese 3: Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben.
Verwerfung	Hypothese 4: Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung.

**Tabelle 13: Annahme und Verwerfung der Hypothesen**

Die Ablehnung von Hypothese 4 lag darin begründet, dass virtuelle Kraftwerke in der Praxis nicht aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung bestehen. Verbraucher und Energiespeicher werden optional eingesetzt und sind kein fester Bestandteil.

Im Verlauf der Untersuchung ergaben sich einige Fragen, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet wurden. Es wurde festgestellt, dass KWK-Anlagen vermehrt in virtuellen Kraftwerken integriert sind und in Zukunft weiterhin integriert werden. Unklar blieb allerdings, wie hoch der Anteil der erzeugten Energie ist, welche durch KWK erzeugt wird, wenn man sie im Verhältnis zu den anderen Erzeugungsanlagen betrachtet. Weiterhin war nicht ersichtlich, warum KWK-Anlagen überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben werden.

Im Zuge der telefonischen Kontaktaufnahme gab ein Befragter an, dass das virtuelle Kraftwerk nicht mehr betrieben wird. In diesem Zusammenhang ergaben sich die Fragen warum der Betrieb aufgegeben wurde und ob es sich um einen Einzelfall handelt.

Weiterhin wurde nicht untersucht, welche Alternativen es zum Konzept des virtuellen Kraftwerks gibt, um mit der Volatilität der erneuerbaren Energien umzugehen.

Insgesamt handelt es sich beim Konzept des virtuellen Kraftwerks jedoch um ein zukunftssträchtiges Vorhaben, das die Umsetzung der Energiewende in vielen Aspekten unterstützt.

## Anhang A – Fragebogen

### Marktuntersuchung zu virtuellen Kraftwerken in Deutschland

Diese Befragung richtet sich an inländische Betreiber virtueller Kraftwerke (*kurz: VK*), welche sich in ihrer Außendarstellung (Website) als solches präsentieren.

Sofern Sie an der Befragung teilnehmen, werden Ihnen die Ergebnisse der Untersuchung selbst-verständlich zur Verfügung gestellt.

Bitte senden Sie den Fragebogen bis zum **23.05.2014** an: [sandra.harries@stud.fh-hannover.de](mailto:sandra.harries@stud.fh-hannover.de)

Der Fragebogen ist folgendermaßen gegliedert:

- A. Allgemeiner Teil
- B. Komponenten des virtuellen Kraftwerks
- C. Betrieb des virtuellen Kraftwerks

<b>Datum:</b>	Klicken Sie hier, um ein Datum einzugeben.
<b>Name des VK:</b>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
<b>Betreiber des VK:</b>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

#### A. Allgemeiner Teil

**1. In welchen Geschäftsfeldern ist Ihr Unternehmen tätig?** *Mehrfachnennungen möglich.*

- ☐ Energieerzeugung
- ☐ Energiehandel
- ☐ Energieverteilung
- ☐ Energieversorgung
- ☐ Vertrieb
- ☐ Forschung und Entwicklung
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**2. Wie viele Mitarbeiter hat Ihr Unternehmen? Wie viele Mitarbeiter betreiben das VK?**

Mitarbeiter gesamt: Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

Mitarbeiter des VK: Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**3. An welchem Standort befindet sich die Leitwarte / Zentrale Ihres VK?**

Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**4. In welcher Entwicklungsphase befindet sich Ihr VK?**

- ☐ Forschungs- oder Pilotprojekt | Laufzeit: Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
- ☐ Kommerzielle Nutzung

**5. Wann wurde das VK in Betrieb genommen?**

Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**6. Wie definieren Sie ein „Virtuelles Kraftwerk“?**

## **B. Komponenten des virtuellen Kraftwerks**

### **Energiespeicher**

**7. Verwenden Sie Energiespeicher im VK?**

☐ Ja ☐ Nein → weiter mit Frage 10

**8. Welche Art von Energiespeicher wird im VK verwendet? Mehrfachnennungen möglich.**

- ☐ Pumpspeicherwerk
- ☐ Druckluftspeicherwerk
- ☐ Schwunghmassespeicher
- ☐ Supraleitende Spulen
- ☐ Kondensatoren
- ☐ Redox-Flow-Batterie
- ☐ Natrium-Schwefel-Batterie
- ☐ Power-to-Gas
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**9. Wie viel Energie kann im VK maximal gespeichert werden?**

**Wie hoch ist die durchschnittliche Auslastung der Speicher in Prozent?**

Maximale Kapazität: Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

Durchschnittliche Auslastung: Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

## Energieerzeugungsanlagen

[illegible]

---

- 11. Wer ist der Eigentümer der Erzeugungsanlagen?** *Mehrfachnennungen möglich.*
- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Der Betreiber des VK      | <input type="checkbox"/> Verkehrsbetriebe                                      |
| <input type="checkbox"/> Privatpersonen            | <input type="checkbox"/> Die großen Vier (TenneT, 50hertz, etc.)               |
| <input type="checkbox"/> Industrieunternehmen      | <input type="checkbox"/> Kommunale Energieversorger                            |
| <input type="checkbox"/> Handel und Gewerbe        | <input type="checkbox"/> Sonstige Energieversorger                             |
| <input type="checkbox"/> Landwirte                 | <input type="checkbox"/> <a href="#">Klicken Sie hier, um Text einzugeben.</a> |
| <input type="checkbox"/> Öffentliche Einrichtungen | <input type="checkbox"/> <a href="#">Klicken Sie hier, um Text einzugeben.</a> |

**12. Welchen Anteil nehmen erneuerbare Energien an der Stromerzeugung in Ihrem VK ein?**  
Anteil in %: [Klicken Sie hier, um Text einzugeben.](#)

*Sofern der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung nicht 100 % beträgt:*

**13. Welche Erzeugungsanlagen betreiben Sie mit fossilen Brennstoffen? Warum?**

--

## Steuerungszentrale

14. Welche Software / welches System wird zum Betrieb des VK eingesetzt?

**15. Welche Funktionen erfüllt die Software / das System?** *Mehrfachnennungen möglich.*

- ☐ Modellierung der Anlagen
- ☐ Koordinierung der Anlagen
- ☐ Optimierung der Anlagen
- ☐ Erstellung von Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen
- ☐ Statusüberwachung der Anlagen
- ☐ Erstellung von Anlagenprofilen
- ☐ Aggregation der Anlagen zu einem Pool
- ☐ Fahrplanerstellung
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**16. Welche zusätzlichen Funktionen wünschen Sie sich von Ihrer derzeitigen Software?**

## Verbraucher

**17. In welcher Art ist das VK mit Verbrauchern verbunden?**

- ☐ Es gibt eine physische Direktverbindung zum Verbraucher
- ☐ Es gibt keine physische Direktverbindung zum Verbraucher
- ☐ Verbraucher sind kein Bestandteil des VK → weiter mit Frage 20

**18. Welche Verbraucher sind in das VK integriert?**

	Anzahl	Erzeugungsanlagen vorhanden?	Falls ja, welche?
<input type="checkbox"/> Private Haushalte		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Landwirte		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Verkehrsbetriebe		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Industrieunternehmen		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Handel und Gewerbe		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Öffentliche Einrichtungen		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	

**19. Welche verbraucherseitigen Regulierungsmaßnahmen ergreifen Sie?**

- ☐ Keine
- ☐ Demand Side Management
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.



## C. Betrieb des virtuellen Kraftwerks

### Steuerung und Betrieb

20. Worin besteht der größte Zeitaufwand beim Betrieb des VK?

21. Welches sind die größten Herausforderungen beim Betrieb des VK?

### Investitionen

22. Welche Anlagen sollen im nächsten Jahr in das VK integriert werden?

23. Welche Anlagen sollen langfristig in das VK integriert werden?

24. Ist eine internationale Entwicklung des VK angestrebt? Falls ja, in welche Länder?

☐ Ja      ☐ Nein

## Vermarktung und Absatz

**25. Wo bzw. an wen wird der im VK erzeugte Strom verkauft?** *Mehrfachnennungen möglich.*

**Regelenergiemarkt**

- ☐ Primärregelreserve
- ☐ Sekundärregelreserve
- ☐ Minutenreserve

**Börsenhandel (EEX, EPEX)**

- ☐ Terminmarkt
- ☐ Spotmarkt: Intraday
- ☐ Spotmarkt: Day-ahead

**Direktvermarktung**

- ☐ Landwirtschaft
- ☐ Verkehrssektor
- ☐ Öffentliche Einrichtungen
- ☐ Handel und Gewerbe
- ☐ Private Haushalte
- ☐ Industrie
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
- ☐ Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

**26. Bewerten Sie den Konkurrenzdruck durch andere VK auf folgender Skala:**

Sehr hoch	Hoch	Mäßig	Gering	Sehr gering
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**27. Bewerten Sie den Konkurrenzdruck durch konventionelle Kraftwerke:**

Sehr hoch	Hoch	Mäßig	Gering	Sehr gering
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**28. Wie schätzen Sie das Vermarktungspotential des VK für das Jahr 2015 ein?**

Sehr gut	Gut	Akzeptabel	Gering	Sehr gering
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**29. Wie schätzen Sie das Vermarktungspotential des VK langfristig ein?**

Sehr gut	Gut	Akzeptabel	Gering	Sehr gering
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vielen Dank für Ihre Teilnahme !

Die Ergebnisse der Untersuchung sende ich Ihnen nach Fertigstellung der Untersuchung zu.

**Kontaktdaten:**

---

**Sandra Harries**

Rühlmannstraße 1

30167 Hannover

sandra.harries@stud.fh-hannover.de

0177 - 6009798

**Hochschule Hannover**

Fakultät IV - Wirtschaft und Informatik

Ricklinger Stadtweg 120

30459 Hannover

## Anhang B – Matchingtabelle

Frage Nr.	Frage	Allgemeine Daten	Virtuelle Kraftwerke befinden sich in der Erprobungsphase.	Der Markt für virtuelle Kraftwerke befindet sich im Wachstum.	Virtuelle Kraftwerke werden nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben.	Virtuelle Kraftwerke bestehen aus dezentralen Erzeugungsanlagen, Verbrauchern, Energiespeichern und einer zentralen technischen Steuerung.	Gesamt
1	In welchen Geschäftsfeldern ist Ihr Unternehmen tätig?	1					1
2	Wie viele Mitarbeiter hat Ihr Unternehmen? Wie viele Mitarbeiter betreiben das VK?		1				1
3	An welchem Standort befindet sich die Leitwarte / Zentrale Ihres VK?	1					1
4	In welcher Entwicklungsphase befindet sich Ihr VK?		1				1
5	Wann wurde das VK in Betrieb genommen?		1				1
6	Wie definieren Sie ein „Virtuelles Kraftwerk“?					1	1
7	Verwenden Sie Energiespeicher im VK?					1	1
8	Welche Art von Energiespeicher wird im VK verwendet?					1	1
9	Wie viel Energie kann im VK maximal gespeichert werden?					1	1
10	Welche Erzeugungsanlagen sind Teil Ihres VK?				1	1	2
11	Wer ist der Eigentümer der Erzeugungsanlagen?					1	1
12	Welchen Anteil nehmen ern. Energien an der Stromerzeugung in Ihrem VK ein?				1		1
13	Welche Erzeugungsanlagen betreiben Sie mit fossilen Brennstoffen? Warum?				1		1

14	Welche Software / welches System wird zum Betrieb des VK eingesetzt?		1				1
15	Welche Funktionen erfüllt die Software / das System?		1				1
16	Welche zusätzlichen Funktionen wünschen Sie sich von Ihrer derzeitigen Software?		1				1
17	In welcher Art ist das VK mit Verbrauchern verbunden?					1	1
18	Welche Verbraucher sind in das VK integriert?					1	1
19	Welche verbraucherseitigen Regulierungsmaßnahmen ergreifen Sie?					1	1
20	Worin besteht der größte Zeitaufwand beim Betrieb des VK?		1				1
21	Welches sind die größten Herausforderungen beim Betrieb des VK?		1				1
22	Welche Anlagen sollen im nächsten Jahr in das VK integriert werden?			1	1		2
23	Welche Anlagen sollen langfristig in das VK integriert werden?			1	1		2
24	Ist eine internationale Entwicklung des VK angestrebt? Falls ja, in welche Länder?			1			1
25	Wo bzw. an wen wird der im VK erzeugte Strom verkauft?			1			1
26	Bewerten Sie den Konkurrenzdruck durch andere VK-Betreiber			1			1
27	Bewerten Sie den Konkurrenzdruck durch konventionelle Kraftwerksbetreiber			1			1
28	Wie schätzen Sie das Vermarktungspotential des VK für das Jahr 2015 ein?			1			1
29	Wie schätzen Sie das Vermarktungspotential des VK langfristig ein?			1			1

	Dezentrale Erzeugungsanlagen	Energiespeicher	Verbraucher	Steuerungszentrale
Gekoppelter Betrieb kleiner dezentraler Erzeugungseinheiten auf Basis der Mini- und Mikro-KWK Technologie.	dezentrale KWK-Erzeugungseinheiten			gekoppelter Betrieb
Ein Verbund von dezentralen Energieerzeugungsanlagen und Verbrauchern, der von einer Zentralen aus gesteuert werden kann. Der in den dezentralen Anlagen erzeugte Strom wird zentral vermarktet.	dezentrale Energieerzeugungsanlagen		Verbraucher	Zentrale Steuerung
Ein technischer Zusammenschluss von fluktuierenden Erzeugungseinheiten, KWK-Anlagen / flexiblen Gaskraftwerken, Speichern und flexiblen Lasten. Dieses aggregierte Anlagenportfolio kann wie ein eigenständiges Kraftwerk gefahren werden. Somit kann eine zuverlässige / sichere Energieversorgung bereitgestellt werden.	fluktuierende, flexible Erzeugungseinheiten	Speicher	Lasten	techn. Zusammenschluss
Die intelligente Verschaltung technischer Einheiten (Erzeugung und Verbrauch), welche zusammen optimierte Leistungen (Regelenergie, Physische Optionen am Markt) anbieten.	techn. Einheiten (Erzeugung)		techn. Einheit (Verbrauch)	intelligente Verschaltung
Vollständige Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien durch virtuelle und kommunikative Vernetzung von Produzenten und Verbrauchern in der Projektregion.	Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien		Verbraucher	virtuelle und kommunikative Vernetzung
Zusammenschluss von Kraftwerken (unterschiedlicher) Erzeugungsarten, welche einen vorgegeben Stromlieferfahrplan erfüllen.	Kraftwerke unterschiedlicher Erzeugungsarten			Zusammenschluss
Die Zusammenschaltung der dezentralen Anlagen zu einem Verbund, dem Virtuellen Kraftwerk, bietet die ideale Ergänzung zur bestehenden Erzeugungsstruktur. Ziel ist die Bereitstellung flexibel einsetzbarer Kraftwerksleistung, um temporäre Schwankungen im Stromnetz auszugleichen.	dezentrale Anlagen			Zusammenschaltung
Beim virtuellen Kraftwerk werden viele, kleinere Erzeugungsanlagen oder große Stromverbraucher, die an verschiedenen Standorten stehen, miteinander vernetzt und informationstechnisch gebündelt. Diese Verbundlösung realisiert Erzeugungskapazitäten vergleichbar mit denen von herkömmlichen Kraftwerken.	viele kleine Erzeugungsanlagen		Stromverbraucher	Vernetzung und informationstechnische Bündelung
Unter einem virtuellen Kraftwerk versteht Statkraft die intelligente Vernetzung dezentraler Erzeugungseinheiten. Die Energieerzeugung aus einer Vielzahl von Windenergie-, Solar-, Wasser- und/oder Biomasseanlagen wird zentral gesteuert und kann wie bei herkömmlichen Kraftwerken am Bedarf ausgerichtet werden. Die schnelle Kommunikation der einzelnen Anlagen mit der zentralen Steuerungseinheit ist dabei von entscheidender Bedeutung. Denn nur exakte Echtzeitdaten ermöglichen eine flexible und bedarfsgerechte Produktion.	dezentrale Erzeugungseinheiten			intelligent Vernetzt, zentrale Steuerungseinheit
<b>Anzahl Nennungen</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>9</b>

## Anhang D – Datentabelle

				1					
Laufende Nr.	Datum der Befragung	Name des VK	Betreiber des VK	Energieerzeugung	Energiehandel (Börse usw.)	Energieverteilung	Energieversorgung (Verbraucher)	Vertrieb	Forschung und Entwicklung
	0.1	0.2	0.3	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1	16.05.2014	k.A.	TU Dresden	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
2	19.05.2014	Virtuelles Kraftwerk ABGnova	ABGnova GmbH	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
3	19.05.2014	Erneuerbares Kraftwerk (EEKW)	ARGE Netz GmbH & Co.KG	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
4	13.05.2014	Virtuelles Kraftwerk der e2m	energy2market GmbH	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
5	21.05.2014	E-WALD VKW	E-WALD / THD / Projektpartner	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
6	21.05.2014	k.A.	Greenpeace Energy	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
7	21.05.2014	Virtuelles Kraftwerk von Vattenfall	Vattenfall	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
8	22.05.2014	M-Partnerkraft	Stadtwerke München	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
9	23.05.2014	k.A.	Statkraft Markets GmbH	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein

A. Allgemeiner Teil					
1	2		3	4	
(Freitext)	Mitarbeiter gesamt	Mitarbeiter VK	Standort Leitwarte	Forschungs- oder Pilotprojekt	Laufzeit
1.7	2.1	2.2	3	4.1	4.2
k.A.	25	5	Dresden	Ja	Aug 2014
Dienstleister für die Energieeffizienz- und Immobilienbranche	5	2	Frankfurt am Main	Ja	k.A.
Dienstleistung	6	2	Breklum	Ja	01.01.2014 bis 30.06.2015
Dienstleistung	60	k.A.	Leipzig	Nein	/
k.A.	40	Projektpartner und Technologie-campus	Freyung	Ja	05.14 bis 12.2015
k.A.	79	1 (Teilzeit)	Hamburg	Ja	Feb 2013 bis Feb 2015
k.A.	ca. 17.000	5	Berlin	Nein	/
k.A.	ca. 8000	ca. 10	München	Nein	/
k.A.	471 (Deutschland)	6 interne 6 externe	Düsseldorf	Nein	/



	5	6
Kommerzielle Nutzung	Inbetriebnahme des VK	Definition
4.3	5	6
2015 - 2018	2012	Gekoppelter Betrieb kleiner dezentraler Erzeugungseinheiten auf Basis der Mini- und Mikro-KWK Technologie.
Nein	Apr 2012	Ein Verbund von dezentralen Energieerzeugungsanlagen und Verbrauchern, der von einer Zentrallen aus gesteuert werden kann. Der in den dezentralen Anlagen erzeugte Strom wird zentral vermarktet.
01.07.2015	01.01.2014	Ein technischer Zusammenschluss von fluktuierenden Erzeugungseinheiten, KWK-Anlagen / flexiblen Gaskraftwerken, Speichern und flexiblen Lasten. Dieses aggregierte Anlagenportfolio kann wie ein eigenständiges Kraftwerk gefahren werden. Somit kann eine zuverlässige / sichere Energieversorgung bereitgestellt werden.
Ja	2011	Die intelligente Verschaltung technischer Einheiten (Erzeugung und Verbrauch), welche zusammen optimierte Leistungen (Regelenergie, Physische Optionen am Markt) anbieten.
Nein	Aktuell: Planung und erste Umsetzungen	Vollständige Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien durch virtuelle und kommunikative Vernetzung von Produzenten und Verbrauchern in der Projektregion.
Nein	Feb 2013	Zusammenschluss von Kraftwerken (unterschiedlicher) Erzeugungsarten, welche einen vorgegeben Stromlieferfahrplan erfüllen.
Ja	2010	Die Zusammenschaltung der dezentralen Anlagen zu einem Verbund, dem Virtuellen Kraftwerk, bietet die ideale Ergänzung zur bestehenden Erzeugungsstruktur. Ziel ist die Bereitstellung flexibel einsetzbarer Kraftwerksleistung, um temporäre Schwankungen im Stromnetz auszugleichen.
Ja	2010	Beim virtuellen Kraftwerk werden viele, kleinere Erzeugungsanlagen oder große Stromverbraucher, die an verschiedenen Standorten stehen, miteinander vernetzt und informationstechnisch gebündelt. Diese Verbundlösung realisiert Erzeugungskapazitäten vergleichbar mit denen von herkömmlichen Kraftwerken.
Ja	Sep 2012	Unter einem virtuellen Kraftwerk versteht Statkraft die intelligente Vernetzung dezentraler Erzeugungseinheiten. Die Energieerzeugung aus einer Vielzahl von Windenergie-, Solar-, Wasser- und/oder Biomasseanlagen wird zentral gesteuert und kann wie bei herkömmlichen Kraftwerken am Bedarf ausgerichtet werden. Die schnelle Kommunikation der einzelnen Anlagen mit der zentralen Steuerungseinheit ist dabei von entscheidender Bedeutung. Denn nur exakte Echtzeitdaten ermöglichen eine flexible und bedarfsgerechte Produktion.

Energiespeicher													
7	8	9		10									
Energiespeicher	Art der Energiespeicher	Maximale Speicherkapazität	Durschn. Auslastung	Kraft-Wärme-Kopplung	Windkraft	Wasserkraft	Photovoltaik	Biogas	Biomasse	Notstromaggregate	Schaltbare Lasten*	Betreiber	Privatpersonen
7	8	9.1	9.2	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	11.1	11.2
Ja	Thermisch	mehre TWh	k.A.	Mikro-KWK-Systeme	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Nein	/	/	/	BHKW	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Nein	/	/	/	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Nein	/	/	/	KWK-Anlagen	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Ja	k.A.	k.A.	k.A.	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
Nein	/	/	/	BHKW	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Ja	Lithium-Ionen-Batterie, Warmwasserspeicher	k.A.	k.A.	BHKW	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Ja	Biogasspeicher, Wärmespeicher	k.A.	k.A.	BHKW	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Ja	Pumpspeicherspeicher	ca. 1 GWh	ca. 50 %	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja

B. Kompo

Energieerzeugungsanlagen										
11									12	13
Industrie	Handel und Gewerbe	Landwirte	Öffentliche Einrichtungen	Verkehrsbetriebe	Große Vier	Kommunale EVU	Sonstige EVU	(Freitext)	Anteil erneuerbarer Energien	Fossile Brennstoffe, Warum?
11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	11.10	11.11	12	13
Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Kommunale Wohn	0%	k.A.
Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	k.A.	0%	Das VK wird mit Erdgasbefeuelten BHKW betrieben. Diese Anlagen wurden für das Projekt ausgewählt, da sie im Bestand die Mehrheit ausmachen.
Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	k.A.	100%	/
Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	k.A.	90%	k.A.
Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	k.A.	100%	keine
Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	k.A.	> 99 %	Ein Erdgas-BHKW. BHKWs können flexibel geregelt werden. Biomethan und Biogas entsprechen aufgrund der damit mehrheitlich verbundenen Massentierhaltung nicht unserer Vorstellung von gutem Strom.
Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	k.A.	ca. 25 % (VK berücksichtigt nur steuerbare Erzeugungsanlagen! PV und Wind-Anlagen befinden sich in einem anderen Pool bei Vattenfall)	BHKW, weil hier der Brennstoff effizient genutzt wird.
Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	k.A.	> 95 %	V.a. Gasturbinen/BHKW zur Bereitstellung von Regelleistung
Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	k.A.	100%	/

Komponenten des virtuellen Kraftwerks									
Steuerungszentrale									
14	15								
Software / System	Modellierung	Koordinierung	Optimierung	Prognosen	Status	Anlagenprofile	Pooling	Fahrplanerstellung	(Freitext)
14	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9
Eigenentwicklung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	k.A.
CBB Gemini – Virtual Power Plant (CBB)	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	k.A.
„Virtuelles Kraftwerk“ (Fraunhofer IWES)	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	k.A.
Eigenentwicklung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Eigenentwicklung + ein System des Windenergieprognosen anbieters energy & meteo systems	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	k.A.
Eigenentwicklung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Marktkommunikation, Fernsteuerung (inkl. Signal für alle Formen der Regelleistung)
DEMS(Siemens)	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Steuerung der Anlagen
Eigententwicklung mit der Firma energy & meteo systems	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Steuerung der Anlagen

Verbraucher											
16	17	18									
Zusatzfunktionen	Einbindung Verbraucher [1 = physische Verbindung, 2 = keine physische Verbindung, 3 = Verbraucher nicht integriert]	Haushalte	Anzahl Haushalte	Landwirte	Anzahl	Verkehrsbetriebe	Anzahl	Industrieunternehmen	Anzahl	Handel+Gewerbe	Anzahl
16	17	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	18.10
Keine	1	Ja	k.A.	Nein	/	Nein	/	Nein	/	Nein	/
Keine	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
k.A.	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	2	Ja	k.A.	Nein	/	Nein	/	Nein	/	Nein	/
Abbildung der Wärmelasten und Wärmespeicher des BHKWs und deren Berücksichtigung bei der Einsatzplanung des BHKWs.	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
k.A.	2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	1	Nein	/	Nein	/	Nein	/	Ja	k.A.	Nein	/
k.A.	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

				19	20
Öffentliche Einrichtungen	Anzahl	Sonstige	Anzahl	Art der Regulierungsm.	Größte Zeitaufwand
18.11	18.12	18.13	18.14	19	20
Nein	/	Nein	/	Keine	Datenkommunikation
/	/	/	/	/	k.A.
/	/	/	/	/	Da wir das Kraftwerk noch nicht aktiv bewirtschaften besteht der Größte Aufwand momentan in der Anlagenintegration, der Entwicklung von Betriebskonzepten und der Identifikation von regulatorischen Barrieren.
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Anbindung technischer Einheiten Weiterentwicklung der VKW Software Optimierung zu Strombörse
Nein	/	E-WALD	k.A.	k.A.	k.A.
/	/	/	/	/	Überwachung und Beseitigung von Störungen
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	/	Abrechnung und Marktkommunikation/ Verwaltung
Nein	/	Nein	/	Demandside Management	Anlegen neuer Anlagen inkl. Aufbau des Kommunikationsweges Prognose- und Fahrplanerstellung Erweiterung der Steuerungs-funktionalitäten
/	/	/	/	/	Monitoring, Pflege der Kommunikationsverbindung

C. Betrieb des		
Betrieb		
21	22	23
Größte Herausforderungen	Anlagenplanung nächstes Jahr	Anlagenplanung langfristig
21	22	23
Datenkommunikation	Weitere Mikro-KWK Systeme	k.A.
Die größte Herausforderung ist, eine Fernwirktechnik für möglich	Es ist angedacht als nächstes Lasten in das VK zu integrieren.	Neben BHKW anderer Betreiber sollen zukünftig Strom-verbraucher wie Wärmepumpen, Lüftungs-anlagen, Kühlhäuser etc. in den Verbund aufgenommen werden.
k.A.	Biogasanlagen, PV-Anlagen, Verbraucher, BHKWs, Speicher (P2H)	Flexible Gaskraftwerke, Speicher (Batterie, P2G)
k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.
Die technische Anbindung unterschiedlichster Kraftwerke und Speicher. Wirtschaftliche Herausforderungen: Zurzeit können die durch die veranlassten Steuersignale entstehenden Mehrkosten (beim BHKW) nicht durch die Mehrlöse durch die Flexibilität gedeckt werden.	Ein weiteres wärmegeführtes BHKW.	Weitere Windkraftanlagen und BHKWs
Bewältigung von technischer Komplexität und Regulierungsanforderungen	BHKW (EEG und nicht-EEG), Power to Heat, Wärmepumpen, Netzersatzanlagen	BHKW (EEG und nicht-EEG), Power to Heat, Wärmepumpen, Netzersatzanlagen
Sich schnell ändernde Markt- und gesetzliche Rahmenbedingungen, Realisierung von technisch sicheren und zuverlässigen Lösungen bei geringen Margen / Kostendruck	Alle oben (Frage 12) genannten Technologien; Schwungradspeicher, Kältemaschinen	k.A.
Koordination tausender dezentraler Anlagen.	Speicher Verbraucher	Kleine Erzeugungsanlagen

virtuellen Kraftwerks													
		Vermarktung und Absatz											
24		25											
Internationale Entwicklung	Länder	Primärregelreserve	Sekundärregelreserve	Minutenreserve	Terminmarkt	Spot: Intraday	Spot: Day-ahead	Landwirtschaft	Verkehrssektor	Öffentliche Einrichtungen	Handel und Gewerbe	Private Haushalte	Industrie
24.1	24.2	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	25.10	25.11	25.12
Ja	Österreich, Schweiz	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Nein	/	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Nein	/	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ja	Polen, Belgien, Frankreich, ...	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Nein	/	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Nein	/	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Nein	/	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Nein	/	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein



	26	27	28	29
(Freitext)	Konkurrenzdruck durch VK [1 = sehr hoch, 5 = sehr gering]	Konkurrenzdruck durch konv. Kraftwerke [1 = sehr hoch, 5 = sehr gering]	Vermarktungspotenzial 2015 [1 = sehr gut, 5 = sehr gering]	Vermarktungspotenzial langfristig [1 = sehr gut, 5 = sehr gering]
25.13	26	27	28	29
k.A.	5	2	3	2
k.A.	2	4	4	3
k.A.	3	4	3	1
k.A.	2	4	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	5	3	3	2
k.A.	2	3	2	1
k.A.	2	2	2	2
k.A.	2	2	2	2

## Literaturverzeichnis

**Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2011).** *Funktionsweise der*

*Stromversorgung.* Abgerufen am 31. 12. 2013 von Agentur für Erneuerbare Energien: <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken?cont=275>

**Agentur für Klimaschutz Kreis Tübingen gemeinnützige GmbH. (ohne Jahr).**

*Dezentrale Energieversorgung.* Abgerufen am 19. 02. 2014 von Agentur für Klimaschutz: <http://www.agentur-fuer-klimaschutz.de/fachthemen/dezentrale-energieversorgung.html>

**Albersmann, J., Bahn, D., Baum, I., Farin, S., Fecht, T., Reuter, R., et al. (2012).**

*Virtuelle Kraftwerke als wirkungsvolles Instrument für die Energiewende.*  
(PricewaterhouseCoopers AG, Hrsg.)

**Amprion GmbH. (2013).** *Bilanzkreise.* Abgerufen am 17. 12. 2013 von Amprion:

<http://www.amprion.net/bilanzkreise>

**Amprion GmbH. (ohne Jahr a).** *Netzfrequenz.* Abgerufen am 04. 01. 2014 von

Amprion: <http://www.amprion.net/netzfrequenz>

**Amprion GmbH. (ohne Jahr b).** *Regelung der Netze.* Abgerufen am 17. 12. 2013 von

Amprion: <http://www.amprion.net/regelung-der-netze>

**Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2013a).** *Auswertungstabellen zur*

*Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2012.* Abgerufen am 10. 12. 2013 von AGEB: [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ausw\\_06082013ov.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_06082013ov.pdf)

**Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2013b).** *Anwendungsbilanzen für die*

*Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011.* Abgerufen am 12. 02. 2014 von AGEB: <http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/anwendungsbilanzen.html>

**Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2013c).** *Bruttostromerzeugung in*

*Deutschland von 1990 bis 2012 nach Energieträgern.* Abgerufen am 10. 12. 2013 von AGEB: [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=20130809\\_brd\\_stromerzeugung1990\\_2012.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20130809_brd_stromerzeugung1990_2012.pdf)

**Arndt, U., von Roon, S., & Wagner, U. (2006).** Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder

Realität? In: *BWK - Das Energie-Fachmagazin, Band 58* (Nr. 6).

**ASUE. (2005).** *Primärenergie - Sekundärenergie.* Abgerufen am 13. 12. 2013 von

asue: [http://asue.de/themen/umwelt----klimaschutz/grafiken/grafik\\_282.html](http://asue.de/themen/umwelt----klimaschutz/grafiken/grafik_282.html)

- ASUE. (2010).** *Virtuelle Kraftwerke*. Abgerufen am 18. 04. 2014 von ABGnova:  
[http://www.abgnova.de/pdf/2010-11-22\\_ASUE-ABGnova\\_Fernwaerme-Broschuere.pdf](http://www.abgnova.de/pdf/2010-11-22_ASUE-ABGnova_Fernwaerme-Broschuere.pdf)
- ASUE. (2011).** *Smart Meter – Intelligente Zähler*. Abgerufen am 14. 03. 2014 von ASUE: <http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/smart-meter/asue-smart-meter-0211.pdf>
- Auer, H., Haas, R., Faber, T., Weißensteiner, L., & Obersteiner, C. (2006).** *Faire Wettbewerbsbedingungen für Virtuelle Kraftwerke*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2010).**  
*Studiensynapse Energieprogn.* Abgerufen am 06. 05. 2014 von BDEW:  
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_20100908\\_Studiensynapse\\_Energieprognosen\\_Prognosen\\_zur\\_Entwicklung\\_der\\_Stromversorgung\\_und\\_Einord/\\$file/352\\_Energie-Info\\_Studiensynapse%20Energieprognosen.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100908_Studiensynapse_Energieprognosen_Prognosen_zur_Entwicklung_der_Stromversorgung_und_Einord/$file/352_Energie-Info_Studiensynapse%20Energieprognosen.pdf)
- BDEW und ZVEI (Hrsg.). (2012).** *Smart Grids in Deutschland*. Abgerufen am 27. 12. 2013 von Power Plus Communications:  
[http://www.bdew.de/internet.nsf/res/86B8189509AE3126C12579CE0035F374/\\$file/120327%20BDEW%20ZVEI%20Smart-Grid-Broschuere%20final.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/res/86B8189509AE3126C12579CE0035F374/$file/120327%20BDEW%20ZVEI%20Smart-Grid-Broschuere%20final.pdf)
- Beller, S. (2008).** *Empirisch forschen lernen* (2. Auflage Ausg.). Bern: Verlag Hans Huber.
- Bergmann, V., & Scheibe-Keßler, H. (ohne Jahr). *Solarstrahlung*. Abgerufen am 07. 03. 2014 von energieroute.de: <http://www.energiesroute.de/solar/solarstrahlung.php>
- Berndt, H., Hermann, M., Kreye, H. D., Reinisch, R., Scherer, U., & Vanzetta, J. (2007).** *TransmissionCode 2007*. (V. d. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 25. 03. 2014 von BDEW:  
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/\\$file/TransmissionCode2007.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/$file/TransmissionCode2007.pdf)
- BMWi. (2013).** *Energie in Deutschland*. Abgerufen am 12. 02. 2014 von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:  
<http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland>
- Bontrup, H.-J., & Marquardt, R.-M. (2010).** *Kritisches Handbuch der deutschen Elektrizitätswirtschaft*. Berlin: edition sigma.
- Bornemann, C. (2013).** *Was ist ein Verteilnetzbetreiber?* Abgerufen am 30. 12. 2013 von Staffexperts: <http://staffxperts.de/glossar/was-ist-ein-verteilnetzbetreiber/>

- Brauner, G., Poppl, G., & Tiefgraber, D. (2006).** Verbraucher als virtuelles Kraftwerk. (I. u. Bundesministerium für Verkehr, Hrsg.) Wien.
- Bühner, V. (2008).** Grundlagen virtueller Kraftwerke. In VDE (Hrsg.), *Smart Distribution 2020: Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen* (S. 29 - 32). Frankfurt am Main.
- Bundesministerium der Justiz. (2012).** *Erneuerbare-Energien-Gesetz*. Abgerufen am 17. 12. 2013 von Gesetze im Internet: [http://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2009/](http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2009/)
- Bundesministerium der Justiz. (2013a).** *Energiewirtschaftsgesetz*. Abgerufen am 17. 12. 2013 von Gesetze im Internet: [http://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/](http://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/)
- Bundesministerium der Justiz. (2013b).** *Stromnetzzugangsverordnung*. Abgerufen am 12. 17 2013 von Gesetze im Internet: <http://www.gesetze-im-internet.de/stromnzzv/>
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2002).** *Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz*. Abgerufen am 18. 04. 2014 von Gesetze im Internet: [http://www.gesetze-im-internet.de/kwkg\\_2002/BJNR109200002.html](http://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2002/BJNR109200002.html)
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2012).** *Ausgleichsmechanismusverordnung*. Abgerufen am 17. 03. 2014 von Gesetze im Internet: <http://www.gesetze-im-internet.de/ausglmechv/BJNR210100009.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (2011).** *Kurzinfo Energiewende*. Abgerufen am 13. 12. 2013 von bmu: <http://www.bmu.de/themen/klima-energie/energiewende/kurzinfo/?type=98>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (2013).** *Chronologie der Energiewende*. Abgerufen am 13. 12. 2013 von bmu: [www.bmu.de/P124/](http://www.bmu.de/P124/)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (ohne Jahr).** *Energiekonzept*. Abgerufen am 08. 06. 2014 von bmwi.de: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiewende/energiekonzept.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2008).** *Klimaschutz und Energieeffizienz*. Abgerufen am 10. 12. 2013 von BMWi: <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/klimaschutz-und-energieeffizienz,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2011).** *Umbau der Energieversorgung in Deutschland.* Abgerufen am 30. 12. 2013 von E-Energy: [http://www.e-energie.info/documents/umbau-der-energieversorgung-in-deutschland\\_BMWi\\_Dez2011.pdf](http://www.e-energie.info/documents/umbau-der-energieversorgung-in-deutschland_BMWi_Dez2011.pdf)

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2013a).** *Energiewende.* Abgerufen am 13. 12. 2013 von BMWi: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiewende.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2013b).** *Energieträger.* Abgerufen am 13. 12. 2013 von BMWi: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energetraeger.html>

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2013c).** *Energiewende: Energiepolitische Informationen.* Abgerufen am 13. 12. 2013 von BMWi: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiewende-08,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

**Bundesnetzagentur. (2014).** *EEG-Vergütungssätze für PV-Anlagen .* Abgerufen am 16. 03. 2014 von Bundesnetzagentur: [http://www.bundesnetzagentur.de/cln\\_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn\\_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn\\_EEG-VergSaetze\\_node.html;jsessionid=AE63ABA3F80D28DDC2BA756DFFE0123E#doc405794bod](http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze_node.html;jsessionid=AE63ABA3F80D28DDC2BA756DFFE0123E#doc405794bod)

**Bundesregierung. (2011).** *Jahresrückblick 2011.* Abgerufen am 17. 02. 2014 von Die Bundesregierung: <http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2011/12/2011-12-20-jahresrueckblick.html?nn=437032#doc455386bodyText3>

**Bundesverband WindEnergie e.V. (ohne Jahr).** *Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).* Abgerufen am 16. 03. 2014 von BWE Bundesverband Windenergie: <http://www.eeg-aktuell.de/das-eeg/>

**Bundesverband WindEnergie e.V. (ohne Jahr).** *Rückbau.* Abgerufen am 01. 01. 2014 von BWE - Bundesverband WindEnergie: <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/betrieb/rueckbau>

**DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH. (ohne Jahr).** *Stromspeicher: von der Batterie bis zum Pumpspeicherwerk.* Abgerufen am 18. 02. 2014 von Solaranlagen-Portal: <http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher>

- Deutsche Energie-Agentur GmbH. (ohne Jahr).** *Speichertechnologien*. Abgerufen am 14. 02. 2014 von Strategieplattform Power to Gas: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-speichern/speichertechnologien.html>
- Droste-Franke, B. e. (2009).** *Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke*. Berlin: Springer-Verlag.
- E.ON Mitte AG. (2013).** *Normierte Standardlastprofile H0, L0-L2, G0-G6 für Niedersachsen*. Abgerufen am 13. 03. 2014 von E.ON Mitte: [http://www.eon-mitte.com/de/netz/veroeffentlichungen/strom\\_/standardlastprofil\\_verfahren/standardlastprofile\\_2013](http://www.eon-mitte.com/de/netz/veroeffentlichungen/strom_/standardlastprofil_verfahren/standardlastprofile_2013)
- Eiselt, J. (2012).** *Dezentrale Energiewende*. Frankfurt am Main: Springer Vieweg.
- Energietechnische Gesellschaft im VDE. (2007).** *Dezentrale Energieversorgung 2020*. Abgerufen am 11. 12. 2013 von VDE: <http://www.vde.com/de/fg/ETG/Pbl/Studien/Documents/MCMS/VDEStudieDezentraleEnergieversorgung2021.pdf>
- energy & meteo systems GmbH. (ohne Jahr).** *Unsere Leistungen*. Abgerufen am 06. 06. 2014 von energymeteo.de: <http://www.energymeteo.de/leistungen/index.php>
- Entelios AG. (ohne Jahr).** *Demand Response Prinzip*. Abgerufen am 28. 12. 2013 von entelios: <http://entelios.de/demand-response/>
- ENTSO-E. (2013).** *ENTSO-E Member Companies*. Abgerufen am 30. 12. 2013 von ENTSO-E: <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/inside-entso-e/member-companies/>
- European Energy Exchange AG. (2014).** *Im Zentrum des europäischen Energiehandels*. Abgerufen am 07. 05. 2014 von eex: <http://www.eex.com/blob/68252/6b8bc5d9bf880fdf24579696335946fe/d-eex-unternehmen-februar-2014-pdf-data.pdf>
- Graßl, H., Kemfert, C., Lücking, G., Müller, M., & Willenbacher, M. (Hrsg.). (ohne Jahr).** *Grundlast (und Grundlastkraftwerk)*. Abgerufen am 14. 12. 2013 von Klimaretter.info: <http://www.klimaretter.info/tipps-klima-lexikon/6127-grundlastkraftwerk>
- Grathwohl, M. (1983).** *Energieversorgung: Ressourcen, Technologie, Perspektiven* (2. Auflage Ausg.). Berlin: de Gruyter.

- Grunwald, G., & Hempelmann, B. (2012).** *Angewandte Marktforschung*. München: Oldenbourg Verlag.
- Hedtstück, M. (Mai 2011).** *Der Fukushima-Effekt*. Abgerufen am 18. 02. 2014 von FINANCE: <http://www.finance-magazin.de/strategie-effizienz/kosteneffizienz/der-fukushima-effekt/>
- Heidjann GmbH & Co. KG. (ohne Jahr a).** *Spulen*. Abgerufen am 07. 06. 2014 von <http://www.stromspeicher.eu/stromspeicher-systeme/spulen-smes/>
- Heidjann GmbH & Co.KG. (ohne Jahr b).** *REDOX-Flow-Batterien*. Abgerufen am 06. 04. 2014 von Strom-Speicher.org: <http://www.stromspeicher.eu/stromspeicher-systeme/redox-flow-batterien/>
- Heidjann GmbH & Co.KG. (ohne Jahr c).** *Natrium-Schwefel-Batterie*. Abgerufen am 06. 04. 2014 von Strom-Speicher.org: <http://www.strom-speicher.org/stromspeicher/natrium-schwefel-batterie/>
- Hottmann, D. (2013).** *Vorhaltung und Erbringung von Regelenergie*. Von Dirk Hottmann: <http://www.dirk-hottmann.com/vorhaltung-und-erbringung-von-regelenergie/> abgerufen
- i12 GmbH. (ohne Jahr).** *Sekundärenergie*. Abgerufen am 13. 12. 2013 von [energievergleich.de: http://www.energievergleich.de/energielexikon/sekundaerenergie/](http://www.energievergleich.de/energielexikon/sekundaerenergie/)
- INES Energieplanung GmbH. (2013).** *Informationsblatt 02 - Energie*. Abgerufen am 09. 06. 2014 von [http://www.ines-energy.ch/fileadmin/sites/ines/files/Download/IB\\_allg\\_zugaenglich/INES\\_IB02\\_Energie.pdf](http://www.ines-energy.ch/fileadmin/sites/ines/files/Download/IB_allg_zugaenglich/INES_IB02_Energie.pdf)
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (Hrsg.). (2013).** *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte* (5. erweiterte Auflage Ausg.). Berlin: Springer Vieweg.
- Kattermann, W., & Kucera, G. (2011).** *SuperCaps als Alternative zu Sekundärbatterien*. Abgerufen am 11. 03. 2014 von Elektronik Praxis: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/leistungselektronik/articles/305428/>
- Kleimaier, M. (2008).** Bilanzkreis und Regelzone. In VDE (Hrsg.), *Smart Distribution 2020: Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen* (S. 75 - 76). Frankfurt am Main.
- Kommission der europäischen Gemeinschaften. (2007).** *Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EG) Nr.1228/2003 über die Netzzugangsbedingungen für den*

- grenzüberschreitenden Stromhandel*. Abgerufen am 07. 05. 2014 von WKO:  
[https://www.wko.at/Content.Node/Interessenvertretung/Umwelt-und-Energie/3\\_Energie\\_Binnenmarktpaket\\_531.pdf](https://www.wko.at/Content.Node/Interessenvertretung/Umwelt-und-Energie/3_Energie_Binnenmarktpaket_531.pdf)
- Köpke, R. (2012).** *Der Fukushima-Effekt hielt nicht lange*. Abgerufen am 18. 02. 2014 von Badische Zeitung: <http://www.badische-zeitung.de/wirtschaft/der-fukushima-effekt-hielt-nicht-lange--67632419.html>
- Kuschinski, M. (ohne Jahr a).** *Funktionsweise eines BHKW*. Abgerufen am 01. 04. 2014 von Blockheizkraftwerke: <http://www.blockheizkraftwerk-bhkw.net/funktionsweise>
- Kuschinski, M. (ohne Jahr b).** *BHKW Betriebsarten nach Wärme- oder Strommenge*. Abgerufen am 01. 04. 2014 von Blockheizkraftwerk: <http://www.blockheizkraftwerk-bhkw.net/funktionsweise/betriebsarten>
- Leipner, I. (ohne Jahr).** *Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)*. Abgerufen am 05. 06. 2014 von cecu.de: <http://www.cecude.de/kraft-waerme-kopplung-kwk.html>
- Next Kraftwerke GmbH. (2013).** *Regelenergie*. Abgerufen am 23. 03. 2014 von Next Kraftwerke: <http://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenergie>
- Next Kraftwerke GmbH. (ohne Jahr a).** *Direktvermarktung*. Abgerufen am 07. 05. 2014 von Next Kraftwerke: <http://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung>
- Next Kraftwerke GmbH. (ohne Jahr b).** *Marktprämie*. Abgerufen am 18. 03. 2014 von <http://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/marktpraemie>
- Next Kraftwerke GmbH. (ohne Jahr c).** *Managementprämie*. Abgerufen am 19. 03. 2014 von Next Kraftwerke: <http://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/managementpraemie>
- Next Kraftwerke GmbH. (ohne Jahr d).** *Regionale Direktvermarktung*. Abgerufen am 22. 03. 2014 von Next Kraftwerke: <http://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/regionale-direktvermarktung>
- Osterkorn, T., & Petzold, A. (Hrsg.). (2012).** *Energiewende! Was ist eigentlich damit gemeint?* *Stern*(45/2012), 85 - 106.
- photovoltaik-guide.de. (ohne Jahr).** *Blindleistung*. Abgerufen am 31. 12. 2013 von [photovoltaik-guide.de](http://www.photovoltaik-guide.de/blindleistung): <http://www.photovoltaik-guide.de/blindleistung>
- Prognos AG. (2013).** *Entwicklung von Stromproduktionskosten*. Abgerufen am 01. 01. 2014 von prognos:



[http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/131010\\_Studie\\_Belectric\\_Freiflaechen\\_Solarkraftwerke.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/131010_Studie_Belectric_Freiflaechen_Solarkraftwerke.pdf)

**Projekt "Virtual Power Plants". (2013).** *Abschlussbericht Projektgruppe der Hochschule Hannover.* Hochschule Hannover, Hannover.

**Quaschnig, V. (2013).** *Erneuerbare Energien und Klimaschutz* (3. Auflage Ausg.). München: Carl Hanser Verlag.

**R2B ENERGY CONSULTIN. (2013).** *Jahresprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEG geförderten Kraftwerken für das Kalenderjahr 2014.* Abgerufen am 18. 03. 2014 von [Netztransparenz.de](http://www.netztransparenz.de): [http://www.netztransparenz.de/cps/rde/xbcr/netztransparenz/r2b\\_EEG\\_Prognose\\_2014.pdf](http://www.netztransparenz.de/cps/rde/xbcr/netztransparenz/r2b_EEG_Prognose_2014.pdf)

**Rädisch, S. E. (2013).** *Primärenergie, Endenergie, Nutzenergie – was bedeutet das?* Abgerufen am 12. 11. 2013 von Ecoquent Positions: <http://www.ecoquent-positions.com/primaerenergie-endenergie-nutzenergie/>

**Reich, G., & Reppich, M. (2013).** *Regenerative Energietechnik.* Wiesbaden: Springer Vieweg.

**Ridder, N. (2003).** *Öffentliche Energieversorgungsunternehmen im Wandel.* Marburg: Tectum Verlag.

**Schabbach, T., & Wesselak, V. (2012).** *Energie: Die Zukunft wird erneuerbar.* Berlin: Springer Vieweg.

**Schaumann, G., & Schmitz, K. W. (Hrsg.). (2010).** *Kraft-Wärme-Kopplung* (4. Auflage Ausg.). Berlin: Springer-Verlag.

**Schneider, L. (1998).** *Stromgestehungskosten von Großkraftwerken.* (Ö.-I. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 01. 01. 2014 von Öko-Institut e.V.: <http://www.oeko.de/oekodoc/55/1998-001-de.pdf>

**Sedlmaier, H. (2011).** *Gebäudetechnik - Schlauer Wohnen*, Nr. 7. Abgerufen am 01. 01. 2014 von FOCUS-MONEY Online: [http://www.focus.de/finanzen/boerse/gebaeudetechnik-schlauer-wohnen\\_aid\\_598191.html](http://www.focus.de/finanzen/boerse/gebaeudetechnik-schlauer-wohnen_aid_598191.html)

**Servatius, H.-G., Schneidewind, U., & Rohlfing, D. (2012).** *Smart Energy: Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem.* Heidelberg: Springer-Verlag.

**Statista GmbH. (2014).** *Erlöse der Stromanbieter in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2012.* Abgerufen am 05. 05. 2014 von Statista:

<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/7029/umfrage/erloese-der-stromanbieter-in-deutschland-seit-1972/>

**Statista GmbH. (2014).** *Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland nach Verbrauchergruppen im Jahr 2010.* Abgerufen am 12. 03. 2014 von Statista: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/236757/umfrage/stromverbrauch-nach-sektoren-in-deutschland/>

**Statkraft Germany GmbH. (ohne Jahr).** *Energieerzeugung der Zukunft: Das virtuelle Kraftwerk.* Abgerufen am 11. 03. 2014 von Statkraft: [http://www.statkraft.de/images/STK\\_Infografik\\_RZ\\_virtuelles\\_kraftwerk\\_\\_tcm21-29016.jpg](http://www.statkraft.de/images/STK_Infografik_RZ_virtuelles_kraftwerk__tcm21-29016.jpg)

**Ströbele, W., Pfaffenberger, W., & Heuterkes, M. (2012).** *Energiewirtschaft - Einführung in Theorie und Politik* (3. Auflage Ausg.). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

**TenneT TSO GmbH. (2013).** *Status Bilanzkreise Regelzone TenneT TSO GmbH.* Abgerufen am 16. 12. 2013 von TenneT: [http://www.tennet.eu/de/index.php?eID=pmkfdl&file=fileadmin%2Fdownloads%2FKunden%2FStatus\\_Bilanzkreise\\_20131213.xls&ck=ffbc27216e4a2dde481cae006bb46bd8&forcedl=1&pageid=310](http://www.tennet.eu/de/index.php?eID=pmkfdl&file=fileadmin%2Fdownloads%2FKunden%2FStatus_Bilanzkreise_20131213.xls&ck=ffbc27216e4a2dde481cae006bb46bd8&forcedl=1&pageid=310)

**TenneT TSO GmbH. (ohne Jahr).** *Übertragungsnetzbetreiber.* Abgerufen am 30. 12. 2013 von TenneT: <http://www.tennet.eu/de/ueber-tennet/strom/uebertragungsnetzbetreiber.html>

**TransnetBW. (2013).** *Bilanzkreisübersicht.* Abgerufen am 17. 12. 2013 von TransnetBW: <http://www.transnetbw.de/de/strommarkt/bilanzkreismanagement/vertragsgebiete-bilanzkreise>

**trend:research GmbH. (2013).** *Ökostrom: Neue Geschäftsmodelle und Vertriebswege.* Abgerufen am 18. 02. 2014 von trend:research: <http://www.trendresearch.de/studien/15-01138.pdf?c0f208cedadc107bc0b0d6e74a3842ca>

**turnit Gruppe GmbH. (2013).** *Was steckt hinter der EEG-Umlage?* Abgerufen am 16. 03. 2014 von ENERGIE-Tipp: <http://www.energie-tipp.de/news/verbraucher/4151261>

**Verein für Konsumenteninformation (Hrsg.). (2011).** *Stromzähler: Smart Meter.* Abgerufen am 28. 12. 2013 von Konsument.at:

<http://www.konsument.at/cs/Satellite?pagename=Konsument/MagazinArtikel/Detail&cid=318875415162>

**Voith, S. (2013).** *Virtuelle Kraftwerke als Alternative zu Großkraftwerken*. Abgerufen am 13. 12. 2013 von Springer: <http://www.springerprofessional.de/virtuelle-kraftwerke-als-alternative-zu-grosskraftwerken/4130794.html>

**Weis, H. C., & Steinmetz, P. (2012).** *Marktforschung* (8. Auflage Ausg.). (H. C. Weis, Hrsg.) Herne: NWB Verlag.

**Wien Energie Vertrieb GmbH & Co KG. (2012).** *Energiespeicher Schwungrad*. Abgerufen am 07. 03. 2014 von [energieleben.at](http://www.energieleben.at):  
<http://www.energieleben.at/energiespeicher-schwungrad/>

**Wirtschaftslexikon 24. (ohne Jahr).** *Marktwachstum*. Abgerufen am 08. 06. 2014 von [Wirtschaftslexikon24.com](http://www.wirtschaftslexikon24.com):  
<http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/marktwachstum/marktwachstum.htm>

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere eidesstattlich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel *Marktuntersuchung zu virtuellen Kraftwerken* von mir selbstständig, ohne Hilfe Dritter und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt wurde. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form, auch nicht in Teilen, keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

## Statutory Declaration

I declare that I have developed and written the enclosed thesis entitled *Marktuntersuchung zu virtuellen Kraftwerken* entirely by myself and have not used sources or means without declaration in the text. Any thoughts or quotations which were inferred from these sources are clearly marked as such.

This thesis was not submitted in the same or in a substantially similar version, not even partially, to any other authority to achieve an academic grading and was not published elsewhere.

Hannover, 10.06.2014

Sandra Harries